

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Šmíra**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: **Hodnocení svarových spojů provedených laserovým svařováním**  
**Evaluation of Welded Joints Made by Laser Welding**

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii svařování laserem.
2. Proved'te studii materiálů vhodných pro svařování laserem.
3. Pro vybrané typy svarových spojů proved'te optimalizaci parametru svařování laserem.
4. Ověřte vlastnosti svarových spojů.
5. Proved'te diskuzi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I: Učební texty*. 1. vydání. VŠB-TU Ostrava. 2005. 133s. ISBN 80-248-0870-6  
KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty*. 1. vydání. VŠB-TU Ostrava. 2009. 240s. ISBN 978-80-248-2025-5  
HRIVŇÁK, I. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vydání. VSAV Bratislava. 1989. 344s. ISBN 80-224-0016-5  
ČSN EN ISO 15614-1 *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupů svařování - Část. 1: Obloukové a plamenové svařování ocelé a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Český normalizační institut, 2005

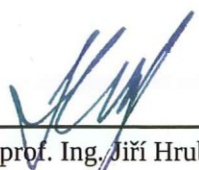
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě : .....15.5.2013.....

..........

podpis studenta

### Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 15.5.2013



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Pavel Šmíra

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Čeladná 540; Čeladná, 739 12

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŠMÍRA, Pavel. *Hodnocení svarových spojů provedených laserovým svařováním*. Ostrava, 2013. 90 s. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie. Vedoucí práce: doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Tato diplomová práce pojednává o problematice laserového svařování a svařitelnosti materiálů touto metodou. K metodě svařování je zde vypracován fyzikální princip metody a vzniku svarového spoje, svařovací zařízení, svařitelnost materiálů, svařovací parametry, výhody a nevýhody metody. V rámci experimentu byla posouzena mikrostruktura svarových spojů vyhotovených laserovým svařováním za pomoci elektronové mikroskopie a měřením mikrotvrdosti. Jednalo se o vzorky vyhotovené z ocelí DOMEX 420 MC D, S235JRG2, X4CrNi18-12, X6Cr13, DC04 a heterogenního spoje oceli L555QB s břitem ze slinutého karbidu K40.

**Klíčová slova:** Laserové svařování; Svařitelnost; Elektronová mikroskopie; Mikrotvrdost; Heterogenní spoj; DOMEX 420 MC D; S235JRG2; X4CrNi18-12; X6Cr13; DC04; L555QB; Slinutý karbid K40

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

SMIRA, Pavel. *Evaluation of Welded Joints Made by Laser Welding*. Ostrava, 2013. 90 p. Master thesis. VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology. Thesis head: Assoc. Prof. Drahomir Schwarz, MSc., Ph.D.

This master thesis is about laser beam welding and laser beam weldability. Theoretical part is focused on physical principles of welding method and making welded joints, welding equipment, weldability, welding parameters and finally advantages and disadvantages of this method. The microstructure of welded joints was evaluated in the experimental section by electron microscopy and microhardness test. The samples for evaluation were made of DOMEX 420 MC D, S235JRG2, X4CrNi18-12, X6Cr13, DC04 steels and one heterogeneous joint of L555QB steel with cemented carbide K40.

**Keywords:** Laser Beam Welding; Weldability; Electron Microscopy; Microhardness Test; Heterogeneous Joint; DOMEX 420 MC D; S235JRG2; X4CrNi18-12; X6Cr13; DC04; L555QB; Cemented Carbide K40



# Obsah

strana

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>7</b>
<b>1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ.....</b>	<b>8</b>
<b>2. SOUČASNÝ STAV .....</b>	<b>10</b>
2.1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ .....	10
2.2 SVAŘOVACÍ ZAŘÍZENÍ .....	12
2.2.1 Laserové svařování pevnolátkovými lasery.....	13
2.2.2 Laserové svařování plynovými lasery .....	17
2.2.3 Laserové svařování diodovými lasery .....	18
2.3 PRINCIP LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ .....	18
2.3.1 Svařování klíčovou dírkou (keyhole welding) .....	19
2.3.2 Svařování vedením tepla.....	19
2.3.3 Pulzní svařování .....	20
2.3.4 Propustné svařování.....	21
2.3.5 Úprava svarových ploch.....	21
2.4 SVAŘITELNOST MATERIÁLŮ LASEROVÝM SVAŘOVÁNÍM .....	22
2.4.1 Materiály vhodné pro laserové svařování.....	24
2.5 PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ .....	28
2.3.4 VÝHODY A NEVÝHODY LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ.....	31
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>33</b>
3.1 POPIS EXPERIMENTÁLNÍ APARATURY.....	33
3.1.1 Zkoušky mikrotvrdosti svarových spojů.....	33
3.1.2 Elektronová mikroskopie .....	34
3.1.3 Spektrální analýza chemického složení .....	37
3.2 POPIS ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ .....	38
3.2.1 Vzorky.....	38
3.2.2 Vlastnosti materiálů.....	43
3.3 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ.....	48
3.3.1 Výsledky zkoušek vzorku L1.....	48
3.3.2 Výsledky zkoušek vzorku L3.....	54
3.3.3 Výsledky zkoušek vzorku L4.....	60

3.3.4 Výsledky zkoušek vzorku L5.....	65
3.3.5 Výsledky zkoušek vzorku L6.....	69
3.3.6 Výsledky zkoušek vzorku L7.....	74
3.4 ZHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ .....	79
<b>4. DISKUZE VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR .....</b>	<b>83</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ.....</b>	<b>86</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>87</b>

## Seznam použitých značek a symbolů

<b>52</b>	Laserové svařování	<i>Označení dle ČSN EN ISO 4063</i>
<b>DPSS</b>	Diodami buzený pevnolátkový laser	<i>Diode Pumped Solid State</i>
<b>EBS</b>	Difrakce zpětně odražených elektronů	<i>Electron Backscatter Diffraction</i>
<b>EDX</b>	Energiově disperzní spektroskopie	<i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i>
<b>LPSS</b>	Výbojkami buzený pevnolátkový laser	<i>Lamp Pumped Solid State</i>
<b>OES</b>	Optická emisní spektrometrie	<i>Optical Emission Spectroscopy</i>
<b>SEM</b>	Rastrovací elektronová mikroskopie	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
<b>SK</b>	Svarový kov	
<b>TEM</b>	Transmisní elektronová mikroskopie	<i>Transmission Electron Microscopy</i>
<b>TOO</b>	Tepelně ovlivněná oblast	
<b>XRF</b>	Rentgenová fluorescence	<i>X-ray Fluorescence</i>
<b>ZM</b>	Základní materiál	
$\lambda$	Vlnová délka	<i>Základní jednotka [m]</i>

# **1. Úvod do problematiky laserového svařování**

Laserové svařování (52) prodělalo od devadesátých let do dnešních dnů poměrně dynamický vývoj. Tento vývoj se týká hlavně velkého rozšíření aplikací, které je spojeno hlavně s vývojem nových konstrukcí svařovacích zařízení, jejich zdokonalováním, zvyšováním výkonu a vylepšováním procesů svařování. Je to především důsledkem stále se zvyšujícího výskytu pro běžné metody svařování obtížně svařitelných materiálů. Ve velké míře přispěly i rostoucí požadavky na zvyšování produktivity výroby, opakovatelnost technologického procesu a robotizaci výrobního procesu. <sup>[1][2]</sup>

Oproti klasickým metodám svařování má metoda 52 přednosti hlavně ve vyšší kvalitě svaru, menší šířce TOO, větší hloubce průvaru, svařování bez aplikace přídavného materiálu, sníženém množství vneseného tepla, vysoké produktivitě a snadnější možnosti automatizace. Touto metodou je také možné svařovat materiály nebo i heterogenní svarové spoje, které klasickými metodami svařování nejsou svařitelné.

Metoda svařování 52 je v dnešní době rozšířena hlavně v automobilovém, elektrotechnickém a leteckém průmyslu, také i v lékařství a stále více i v dalších odvětvích. Nejvíce je však rozšířená v automobilovém průmyslu, kde je používána hlavně pro spojování dílů karoserií a také ke svařování převodových a motorových komponentů. Velkou perspektivu má také v oblasti výroby svarových spojů pro drážní techniku. Lze předpokládat, že se nadále bude aplikace této metody svařování rozšiřovat. <sup>[3][4][5]</sup>

I přes nesporné výhody této metody je její použití, v porovnání s klasickými metodami svařování, jen okrajové. Toto je dáno hlavně vysokými pořizovacími a provozními náklady zařízení, které metodu předurčují hlavně k aplikaci na těžko svařitelné a speciální materiály a do výrobních procesů, kde je požadována vysoká produktivita procesu aj. speciální požadavky na proces svařování. Oproti klasickým metodám svařování je princip vzniku svarové lázně a následně i spoje metodou 52 mnohem složitější a zasahuje do něj větší množství aspektů, mezi něž patří aspekty svařovacího zařízení, parametrů svařování, materiálových vlastností, prostředí svařování a mnoha jiných.

Hodnocením vybraných svarových spojů provedených metodou svařování 52 máme možnost získat nové poznatky o procesu svařování a svařitelnosti materiálů pomocí této metody. Vznik svarového spoje touto metodou má oproti běžným metodám svá specifika,

jako jsou hlavně velmi koncentrovaný zdroj energie, který natavuje základní materiál a tak z něj tvoří svarovou lázeň, a velmi vysoká rychlost ohřevu a ochlazování svarové lázně. Tyto vlastnosti mají zásadní vliv na výslednou mikrostrukturu svarového spoje. Proto je velmi důležité, aby byla, u spojů vyrobených touto metodou svařování, prioritně posouzena jejich mikrostruktura. K tomuto hodnocení mikrostruktury je nanejvýš vhodné použít, díky svým rozlišovacím schopnostem, elektronovou mikroskopii a doplnit ji o průběh mikrotvrdosti v jednotlivých oblastech svarového spoje.

## **2. Současný stav**

První laserové zařízení bylo sestrojeno roku 1960 Theodorem Haroldem Maimanem. Jednalo se o pevnolátkový laser s rubínovým aktivním prostředím, který využíval pouze tři energetické hladiny a nebyl schopen dodávat kontinuální paprsek. Problém kontinuálního paprsku pak vyřešili fyzikové Nikolaj Basov a Alexandr Prochov. Všem třem fyzikům byla udělena roku 1964 Nobelova cena za fyziku „za zásadní výzkum v oboru kvantové elektroniky, který vedl ke konstrukci oscilátorů a zesilovačů založených na principu maserů a laserů.“ K prvnímu významnému využití této metody svařování došlo v roce 1976 ve společnosti General Motors, která touto metodou začala svařovat ventily motorů pro automobily. <sup>[6]</sup>

V současné době rozlišujeme mnoho druhů laserových zařízení. Hlavními typy jsou v současnosti lasery typu Nd: YAG, CO<sub>2</sub>, diskové, vláknové a diodové lasery. <sup>[7]</sup>

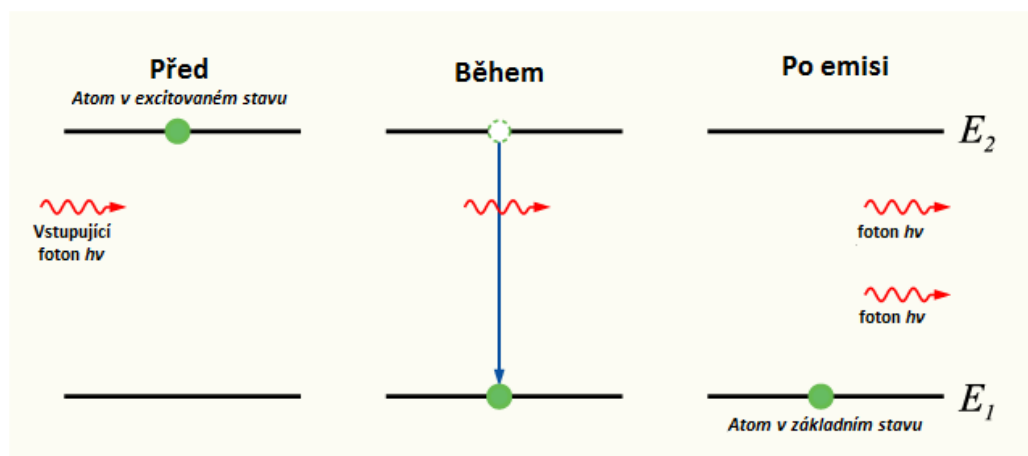
Norma ČSN EN ISO 4063 podle druhu aktivního prostředí, ve kterém vzniká laserové záření, rozděluje metodu 52 na metody svařování:

- Laserové svařování pevnolátkovými lasery (metoda svařování 521)
- Laserové svařování plynovými lasery (metoda svařování 522)
- Laserové svařování diodovými lasery (metoda svařování 523)

### **2.1 Fyzikální podstata laserového svařování**

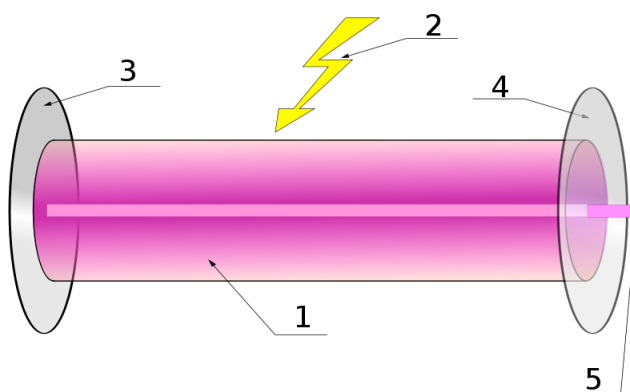
Slovo laser je akronym z anglického „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což v překladu znamená „zesílení světla stimulovanou emisí záření.“ Jedná se o zdroj, který emituje monochromatické koherentní elektromagnetického záření získané stimulovanou emisí fotonů zdrojového záření.





**Obr. 2.1** Princip stimulované emise <sup>[8]</sup>

Interakcí fotonů z budícího zdroje energie v aktivním prostředí dochází k vybuzení elektronů ze základní hladiny  $E_1$  do excitované hladiny  $E_2$ . Elektron zde může setrvat po dobu „života excitovaného stavu“  $\tau$ , doba setrvání je řádově ( $10^{-3} \div 10^{-7}$ ) s. Následně se navrácí na základní hladinu  $E_1$  za současného vyzáření fotonu s náhodnou polarizací, směrem, fází a vyzáření energie – tzv. spontánní emise. Přejde-li excitovaná soustava do stavu s nižší energií ještě před spontánní emisí, získáme stimulovanou emisi (*Obr. 2.1*), která je důležitá pro laserové aplikace. Při interakci fotonu, jehož energie se rovná rozdílu energetických hladin v atomu, s excitovaným elektronem dochází k vyzáření dalšího fotonu se stejnou fází, směrem a polarizací jako vstupující foton. Nutnou podmínkou pro praktické použití stimulované emise je vytvoření tzv. inverzní populace. Tu dosáhneme tím, že nám bude převažovat počet elektronů na vyšší hladině nad počtem elektronů na hladině nižší. <sup>[8] [9]</sup>



**Obr. 2.2** Schéma aktivního prostředí pevnolátkového laseru <sup>[1]</sup>

*I* - aktivní prostředí, 2 – budící zdroj energie, 3 - odrazné zrcadlo, 4 - polopropustné zrcadlo,  
5 - laserový paprsek

Pro dosažení požadovaných vlastností paprsku je ve většině případů aktivní prostředí umístěno do rezonátoru. Tento rezonátor je nejčastěji tvořen dvěma rovnoběžnými zrcadly, mezi něž je umístěno aktivní prostředí. Jedno zrcadlo je odrazové s odrazivostí 99,9% a druhé je polopropustné. Tím dosáhneme toho, že se v aktivním prostředí budou fotony neustále emitovat, dokud nedosáhnou dané intenzity. Následně tok fotonů opouští rezonátor polopropustným zrcadlem, odkud již vystupují jako laserový paprsek.

Některé typy laserů, které nazýváme superradiační, nepotřebují rezonátor, jelikož dokážou vytvořit laserový paprsek o dostatečně vysoké intenzitě hned při prvním průchodu aktivním prostředím. Mezi tyto lasery řadíme např. dusíkový laser a měděný laser.

## 2.2 Svařovací zařízení

V dnešní době existuje velké množství druhů laserů, a nelze říci, že by jeden z nich byl optimální pro zpracování veškerého materiálu. Každý druh má svůj potenciál, který je nutné cíleně využívat pro příslušnou aplikaci. V zásadě zde platí, že různé aplikace kladou různé požadavky na zdroj paprsků a výrobní systém. <sup>[1][10][11]</sup>

Přehled základních typů průmyslových laserů								
Laser	Vlnová délka	Buzení	Účinnost	Režim	Výkon	Typická aplikace	Údržba	Životnost [h]
Nd:YAG	1 064 nm	LD	~ 7 %	CW	až 6 kW	Ř, S	ano	~ 10 000
				pulzní	~ 100 W	Z, G		
		Lampy	~ 3 %	pulzní	~ 600 W	S, V		~ 1 000
CO <sub>2</sub>	10 600 nm	RF	~ 10 %	CW / pulzní	(10÷250) W	Z, G, Ř*	ano	~ 20 000
					až 5 kW	Ř, S		
		el.	~ 25 %		až 20 kW	Ř, S		-
Diskový	1 070 nm	LD	~ 15 %	CW	až 16 kW	Ř, S	ano	~ 10 000
Vláknový	1 070 nm	LD	~ 30 %	CW	až 80 kW	Ř, S	ne	~ 100 000
				QCW	~ 1,2 kW	Ř, S		
				pulzní	~ 100 W	Z, G, M		
Diodový	(808÷980) nm	el.	~ 60 %	CW	až 10 kW	S, K, N	ne	~ 15 000
<p>*nekovové materiály  <b>Typické aplikace:</b> Ř – řezání, S – svařování, Z – značení, G – gravírování, K – kalení, N – nanášení vrstev, M – mikroobrábění  <b>Buzení:</b> LD – laserové diody, RF – radiofrekvenční, el. – elektrický  <b>Režim:</b> CW – kontinuální, QCW – kvazipulzní</p>								

**Tab. 2.1** Přehled základních typů laserů a jejich použití <sup>[10]</sup>

## 2.2.1 Laserové svařování pevnolátkovými lasery

V současnosti nejpoužívanějšími pevnolátkovými lasery jsou lasery typu Nd:YAG, diskové a vláknové. Hlavní rozdíl mezi těmito typy je v geometrii aktivního prostředí. Ohromnou výhodou těchto laserů je, díky vlnové délce okolo 1  $\mu\text{m}$ , možnost vedení laserového paprsku do místa procesu pomocí flexibilního optického kabelu. <sup>[1][4]</sup>

Pevnolátkové lasery rozdělujeme podle buzení laseru: <sup>[1]</sup>

I. generace – buzené výbojkami

II. generace – buzené diodami

III. generace – diskové lasery

Zařízení I. generace se vyznačují nižší investiční náročností, ale dražším provozními náklady, z důvodu časté výměny výbojek. Účinnost přeměny elektrické energie na světelnou je okolo 3% a max. výkon okolo 600 W

Zařízení II. generace je shodné se zařízením I. generace, avšak neobsahuje výbojky, které jsou nahrazeny diodami. Účinnost je zvýšena až na 30%

Zařízení III. generace přichází s novou konstrukcí laserového zařízení uspořádaného do disku. Tyto lasery mají účinnost okolo 15 % a výkon až 4 kW. Lasery se dají zapojovat do série, čímž lze získat výkon až 16 kW.

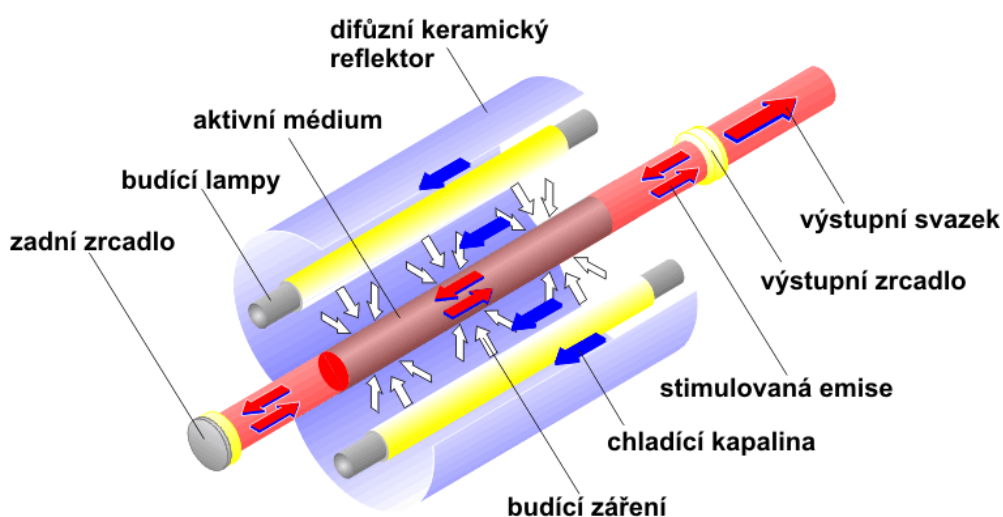
### Nd:YAG lasery

Jedná se o nejstarší a nejpoužívanější druh laseru z této skupiny. Aktivní prostředí Nd:YAG laseru tvoří výbrus krystalu Yttrium Aluminium Granátu ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) dopovaný ionty neodymu ( $\text{Nd}^{3+}$ ). Ten je osvětlován buď budícími xenonovými výbojkami, nebo laserovými diodami. <sup>[1]</sup>

U výbojkami buzených zařízení (LPSS – lamp pumped solid state) je rezonátor tvořen pokovenou dutinou, do níž jsou vloženy výbojky a aktivní prostředí. Účelem pokovené dutiny je, aby byla většina světla odražena zpět do krystalu, čímž se zvýší účinnost tvorby paprsku (Obr. 2.3). Výbojky mají malou účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, neboť se velká část energie promění na teplo. Z tohoto důvodu je třeba zajistit vodní chlazení

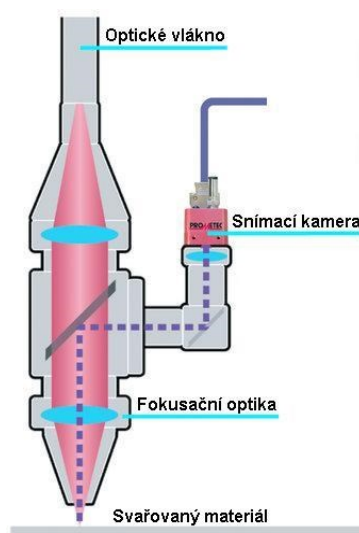
rezonátoru. Zařízení se v dnešní době používají zejména pro svařování v pulzním režimu a vrtání (např. ušlechtilých ocelí v leteckém průmyslu). Výhodou LPSS laserů je vysoká energie pulzu, které tyto aplikace vyžadují. Nevýhodami jsou vysoké provozní náklady a nízká životnost výbojek, nízká účinnost a velké nároky na chlazení. <sup>[1][4]</sup>

Diodami buzené lasery (DPSS – diode pumped solid state) obsahují kolimační optiku, kterou je záření z diod usměrňováno na aktivní prostředí Nd:YAG krystalu. I přes zvýšení účinnosti oproti LPSS laserů je stále třeba zajistit chlazení diod. DPSS lasery se používají v tzv. Q-spínávaném pulzním režimu (velmi krátké pulzy v řádu ms a průměrným výkonem do 100 W). DPSS lasery se více než ke svařování používají ke gravírování kovů, plastů aj. materiálů. Oproti LPSS laserů mají lepší kvalitu paprsku, delší životnost, vyšší účinnost a menší nároky na chlazení. <sup>[1][4]</sup>



**Obr. 2.3** Konstrukce Nd:YAG laseru buzeného výbojkou <sup>[10]</sup>

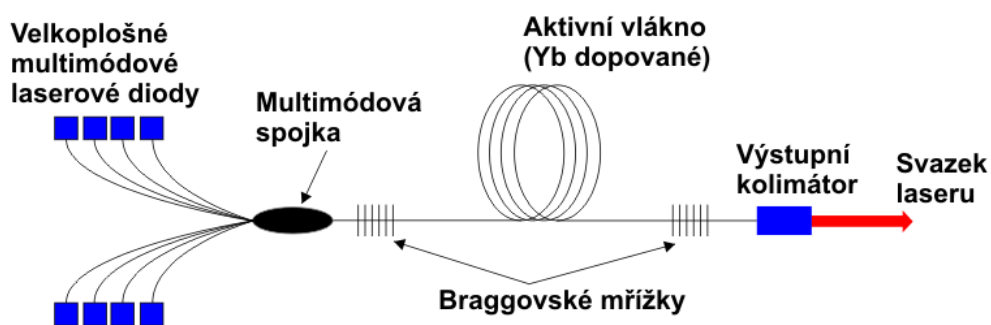
Paprsek je ze zdroje laserového paprsku dále přenášen optickým kabelem do aplikační hlavy, která má za úkol paprsek zaostřit na danou ohniskovou vzdálenost a dopravit jej přímo do místa aplikace. Zaostření se provádí pomocí optických čoček nebo v menší míře i pomocí zrcadel. K ochraně svarové lázně a částečně i ochraně fokusační optiky lze z aplikační hlavy přivádět ochranný plyn. Pomocí snímací kamery a systému zrcadel lze monitorovat svařovací proces, popř. přesně nastavovat a korigovat polohu dopadu laserového paprsku (Obr. 2.4). <sup>[1]</sup>



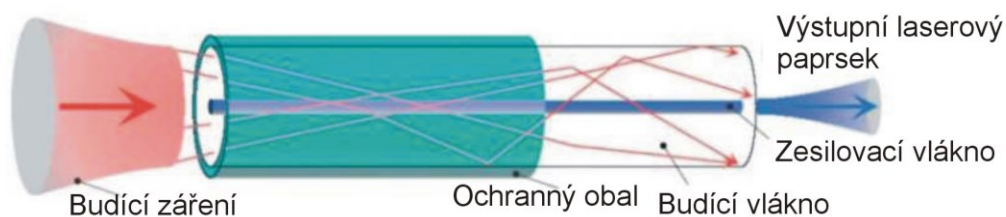
**Obr. 2.4** Aplikační hlava pro laserové svařování <sup>[1]</sup>

## Vláknové lasery

Vláknové lasery jsou konstrukčně nejmodernější pevnolátkové lasery s příčným buzením. Aktivní prostředí zde tvoří vlákno s extrémní štíhlostí (průměr vlákna  $(50 \div 300) \mu\text{m}$  a délka v řádu metrů), tvořené atomy vzácných zemin jako Ytterbium, Erbium, Thulium. Buzení je prováděno diodami, které jsou na vlákno navázány pomocí optických spojek. Aktivní prostředí je místo běžných zrcadel ohraničeno Braggovými mřížkami (zrcadly), což jsou struktury vytvořené přímo v optickém vlákne. Svazek paprsků z vlákna dále putuje přes optický kolimátor a následně přes optický kabel do aplikační hlavy. Vláknové lasery pracují v kontinuálním, pulzním nebo kvazipulzním (režim s elektronicky modulovatelným výkonem) režimu. Tato zařízení dosahují výkonu až 80 kW s až 35 % účinností. Výhodou je jednoduchost a modularita zařízení, nízké provozní náklady zařízení, vysoká životnost a vysoká kvalita laserového svazku. Zařízení je takřka bezúdržbové. <sup>[1][4]</sup>



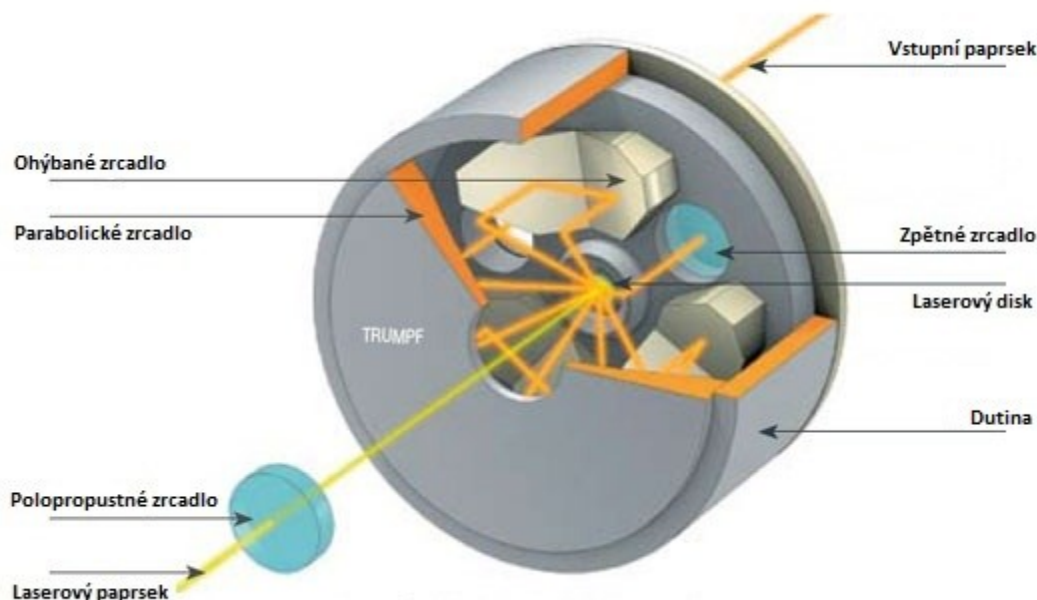
**Obr. 2.5** Konstrukce vláknový laser <sup>[10]</sup>



**Obr. 2.6** Aktivní prostředí vláknového laseru <sup>[1]</sup>

## Diskové lasery

Principiálně je podobný Nd:YAG laseru, aktivní prostředí má však tvar malého disku, jehož výhodou je rovný teplotní profil po celém disku. Toto nám přináší možnost dosažení vysokých výkonů (až 16 kW) a dobrou kvalitu výstupního svazku. Výstupní výkon laserového paprsku lze získat dvěma způsoby. U prvního způsobu se výkon řídí přímo výkonem čerpacího zdroje, který se skládá z diodových modulů. U druhého způsobu jsou disky uspořádány v optické sérii, čímž dosáhneme zvýšení výkonu při zachování stejné kvality paprsku. Dosud jsme schopni do série propojit max. 4 disky, čímž byl získán výkon až 16 kW. Diskové lasery se aplikují především na výkonově náročné operace, jako je řezání a svařování kovů. Zařízení má oproti vláknovým laserům nižší účinnost a životnost. <sup>[1][4]</sup>

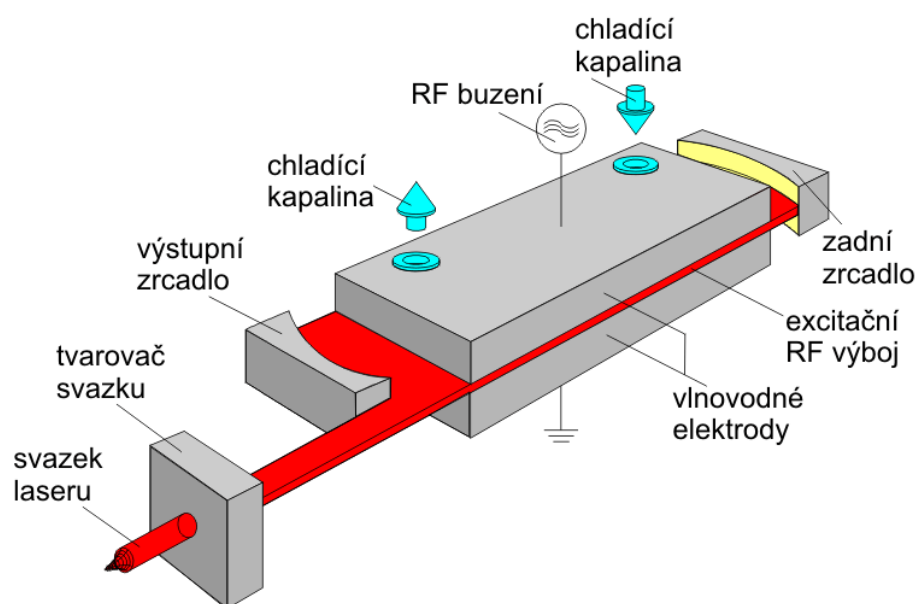


**Obr. 2.7** Schéma diskového laserového zařízení <sup>[12]</sup>



## 2.2.2 Laserové svařování plynovými lasery

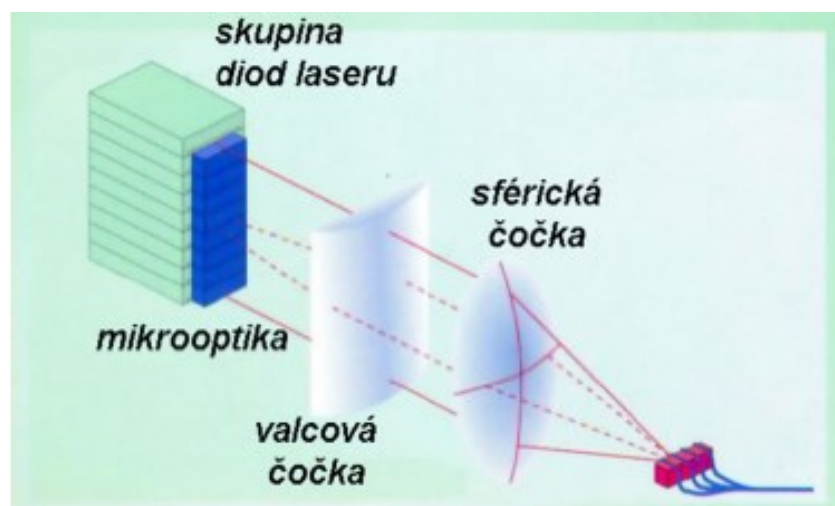
Nejpoužívanějším a nejvýkonnějším průmyslovým laserem této skupiny laserů patří CO<sub>2</sub> lasery. Aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů He + N<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> (případně i H<sub>2</sub> nebo Xe), která je uzavřena v hermeticky uzavřeném rezonátoru nebo v tzv. průtočném rezonátoru. Plyn v průtočném rezonátoru neustále proudí, což je nutné u vysokých výkonů ~ 10 kW. Aktivní prostředí je buzeno nejčastěji vysokofrekvenčním nebo doutnavým výbojem, což se řídí směrem proudění plynu v aktivním prostředí. Plyn aktivního prostředí je chlazen průchodem přes chladič při nuceném oběhu. U nových typů zdrojů chlazení probíhá difúzně, pomocí vodou chlazených deskových elektrod, mezi nimiž probíhá výboj (*Obr. 2.8*), díky čemuž se sníží provozní náklady zařízení. Plynové lasery mohou dosahovat výkonu až 20 kW s účinností až 25 %. Kvůli vlnové délce paprsku 10,6 μm nelze paprsek vést optickým vláknem. Paprsek je transportován do místa svaru pomocí systému zrcadel, což je velká nevýhoda zařízení, jelikož je doprava technicky komplikovaná a náročná na údržbu, kalibraci a justování zařízení. Velmi výhodné je používat tyto lasery pro značení, gravírování a řezání nekovových materiálů (plasty, sklo, kůže, papír, aj.), kde nelze použít lasery s vlnovou délkou 1 μm. K těmto aplikacím se používají lasery s výkonem do 1,5 kW. Lasery s vyššími výkony se pak používají pro řezání a svařování kovů. <sup>[1][10]</sup>



**Obr. 2.8** Konstrukce CO<sub>2</sub> laseru s deskovými elektrodami <sup>[10]</sup>

### 2.2.3 Laserové svařování diodovými lasery

V průmyslových aplikacích je aktivní prostředí tvořeno převážně blokem GaAs nebo AlGaAs polovodičů v P-N přechodu, které jsou buzeny elektrickým proudem. Tyto diody jsou skládány do řad délky několika mm s výkonem cca 10 W a dále na sebe do sloupců s výkonem až 600 W. Svazek paprsku dále musí procházet systémem čoček, který jej vytvaruje do aplikačně přijatelnější geometrie (*Obr. 2.9*). I přesto má výstupní paprsek nízkou kvalitu (hranatý mód) a nelze jej zaostřit do malého bodu. Lasery mají výstupní výkon 30 W až 10 kW s až 60 % účinností. Diodové lasery jsou, kvůli své špatné kvalitě paprsku, vhodné především pro povrchové aplikace, jako jsou navařování, kalení, nanášení vrstev i svařování. [1][10][13]



*Obr. 2.9* Diodový laser buzený svazkem elektronů <sup>[13]</sup>

## 2.3 Princip laserového svařování

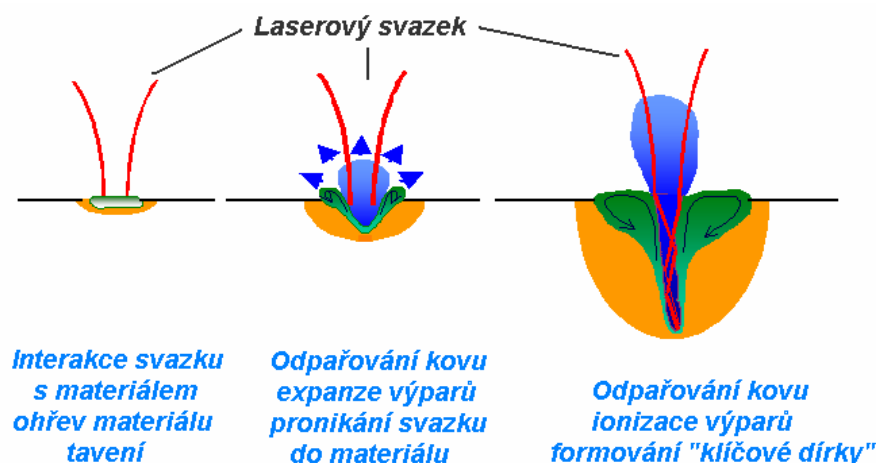
Vzniku svarového spoje laserovým svařováním lze dosáhnout několika způsoby, z nichž každý má své výhody a nevýhody či omezení. Při působení vysoké koncentrace energie laserového paprsku svařujeme tzv. „vedením tepla“ anebo tzv. „klíčovou dírkou (keyhole)“. Pokud použijeme přerušovaný laserový paprsek, hovoříme o pulzním svařování. <sup>[1][2][14]</sup>

V naprosté většině případů tvorby svarového spoje do svarové lázně nepřidáváme přídavný materiál. Ten se aplikuje pouze ve speciálních případech, např. pro účel dolegování svarového kovu (SK) nebo v případě laserového navařování.

### 2.3.1 Svařování klíčovou dírkou (keyhole welding)

Svařování klíčovou dírkou je metoda laserového svařování, při které nám ve svarové lázni vzniká úzká kapilára, která nám umožňuje získat průvar do hloubky až 50 mm při šířce svaru několika mm. [2]

Pro vznik klíčové dírky je třeba zajistit laserový paprsek zřetřusovaný do průměru řádově několika desítek mikrometrů o velmi vysoké koncentraci energie (empiricky nad  $1 \text{ až } 5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ ). Dopadem tohoto proudu fotonů je materiál ohříván mnohonásobně vyšší rychlostí, než je odvod tepla do okolí. Tím dochází k lokálnímu ohřevu dané oblasti do teploty varu svařovaného materiálu a při správné kombinaci svařovacích parametrů (hlavně výkon, ohnisková vzdálenost, rychlost svařování) k vzniku tzv. „klíčové dírky“ (paroplynový kanál). Uzavření této klíčové dírky je zabráněno tlakem plynů, které se v ní nahromadily vypařováním ze svarové lázně, při působení vysoce koncentrované energie. Při posuvu tohoto zdroje tepla ve směru svařování dochází vlivem povrchového napětí svarové lázně k jejímu opětovnému uzavření, rychle krystalizaci svarové lázně a vznik svarového spoje za klíčovou dírkou. Do oblasti svaru je většinou přiváděn ochranný plyn (nejčastěji Ar, He), který má za úkol tvořit ochrannou atmosféru zabráňující oxidaci a pórovitosti SK. Tato atmosféra má také vliv na geometrii svaru a vychýlení plazmového oblouku, vznikajícího ionizováním výparů základního materiálu (ZM) při svařování. [1][2][15]



Obr. 2.10 Princip vzniku „klíčové dírky“ [2]

### 2.3.2 Svařování vedením tepla

Svařováním vedením tepla se materiál taví absorpcí a vedením tepla dopadajícím laserovým svazkem. Při tomto způsobu svařování dostáváme svar o relativně malé hloubce průvaru, jelikož nám nevzniká klíčová dírka. To je dáno snížením plošné hustoty výkonu

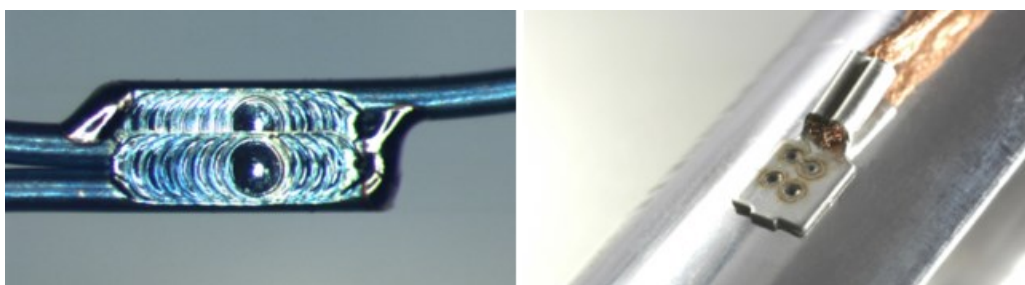
laserového paprsku. Rychlost svařování však může být vyšší, což může být vhodné pro aplikace, kde není prioritní hloubka průvaru či úzký a hluboký svar, ale je upřednostňována vyšší rychlost svařování. Tento princip se používá i u laserového navařování. <sup>[1][2][15]</sup>



**Obr. 2.11** Princip svařování vedením tepla <sup>[2]</sup>

### 2.3.3 Pulzní svařování

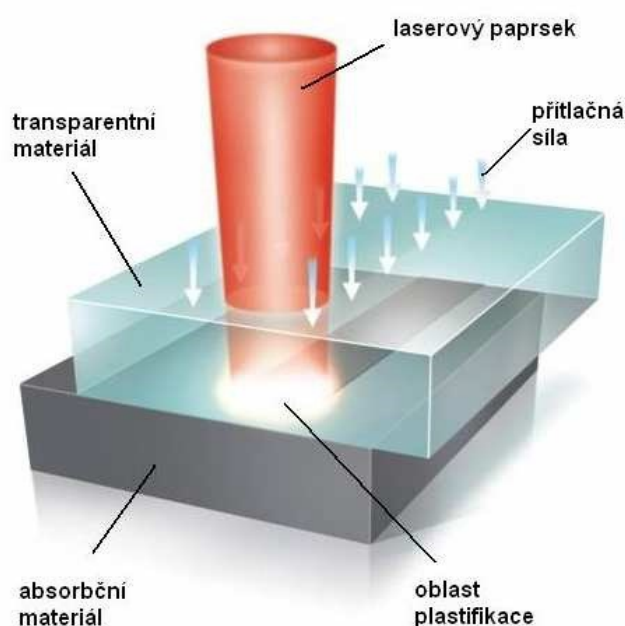
Při této metodě je svarový spoj tvořen množstvím po sobě jdoucích a vzájemně se překrývajících bodů nebo i osamocenými body tzv. „shooty“. Tyto body jsou tvořeny interakcí ZM s pulzním laserovým paprskem, jehož velikou předností je velmi dobrá kontrola nad množstvím vneseného tepla do svarového spoje a jeho snadné korigování. Nejčastěji se používají pulzy o délce ( $5 \div 500$ ) ms a frekvenci pulsů 1 Hz až 100 kHz. Tento druh svařování se používá především pro obtížně svařitelné materiály a součástí velmi malých rozměrů nebo tloušťek. <sup>[1][14]</sup>



**Obr. 2.12** Příklady aplikace pulzního svařování <sup>[16]</sup>

### 2.3.4 Propustné svařování

Tento princip se používá při svařování termoplastů s tím, že jeden materiál musí mít rozdílné absorpční vlastnosti. Horní materiál musí být transparentní a spodní musí paprsek povrchově absorbovat. Laserový paprsek při svařování proniká transparentním materiálem a na povrchu absorpčního materiálu se mění v teplo. Vedením tepla se oba materiály ohřejí, zplastizují a následně i promísí, čímž po zchladnutí vzniká svarový spoj. Na oblast svařování musí být na začátku nebo nejpozději konci svařování vyvíjen přitlačný tlak.<sup>[22]</sup>



**Obr. 2.13** Princip propustného svařování <sup>[22]</sup>

### 2.3.5 Úprava svarových ploch

Hlavní podmínkou laserového svařování je přesné obrobení a ustavení ploch svarové mezery, abychom dosáhli při svařování konstantního průřezu svarové mezery. Tato mezera by měla být široká max.  $(0,2 \div 0,3)$  mm při tloušťce materiálu do 1 mm a nad tuto tloušťku by neměla být tlustší 6 až 7 % nejmenší tloušťky svařovaných ploch. U přeplátovaných (průvarových) svarových spojů je třeba zajistit pevné upnutí svařovaných součástí a mezera mezi nimi by neměla přesáhnout 0,2 mm. <sup>[15]</sup>

## **2.4 Svařitelnost materiálů laserovým svařováním**

Pojem svařitelnost materiálů je nesmírně složitý, jelikož je svařitelnost ovlivňována celou řadou aspektů. Mezi tyto aspekty patří vlastnosti ZM a SK, použita metoda a technologie výroby spoje a také konstrukce svařence. <sup>[17]</sup>

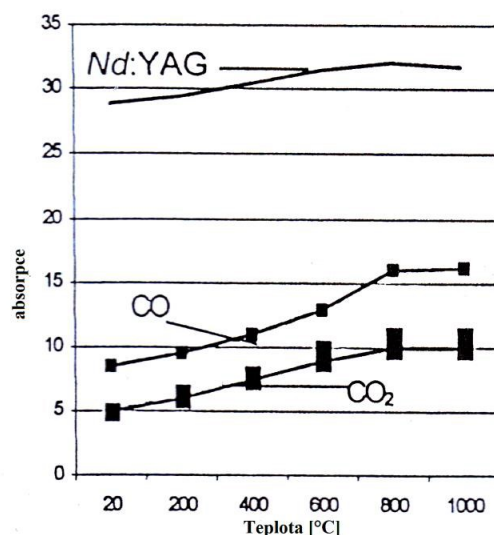
Definice svařitelnosti dle ISO (International Organisation for Standards – Mezinárodní úřad pro normalizaci):

*„Kovový materiál se považuje za svařitelný do určitého stupně při daném způsobu svařování a pro daný účel, lze-li odpovídajícím technologickým postupem svařování dosahovat kovové celistvosti svarových spojů tak, že tyto spoje vyhovují technickým požadavkům, jež se týkají jak vlastností samotných spojů, tak i vlivu těchto spojů a konstrukční celek, jehož součástí tyto spoje jsou.“*

Svařitelnost materiálů při laserovém svařování závisí především na jeho chemickém složení, rozměrech a jeho stavu. Pevnostní vlastnosti spoje závisí především na tvaru a rozměrech SK a na strukturních změnách v něm a v TOO.

Jedním z nejdůležitějších aspektů svařování je interakce svařovaného materiálu s laserovým paprskem. Nejdůležitějšími vlastnostmi paprsku jsou zde vlnová délka paprsku a jeho výkon, u svařovaného materiálu jsou to pak hlavně reflexe (odrazivost) paprsku na daném povrchu a teplota v oblasti svařování. Část energie paprsku je absorbována materiálem a část se na jeho povrchu odráží. Při absorpci paprsku se světelná energie mění na tepelnou. Hloubka průvaru u kovových materiálů je závislá převážně na výkonu zdroje paprsku. S rostoucí teplotou v místě svařování se nám absorpce paprsku zvyšuje (*Obr. 2.13*. Absorpce paprsku u různých kovů závisí na vlnové délce paprsku. Všeobecně lze říct, že s klesající vlnovou délkou se nám absorpce kovu zvyšuje. <sup>[15][19]</sup>





**Obr. 2.14** Graf závislosti absorpce na teplotě <sup>[18]</sup>

Absorpce laserového paprsku je také ovlivnitelná stavem a topografií povrchu (*Tab. 2.2*). Pro zvýšení absorpce lze na povrch materiálu nanést antireflexní vrstvu (grafitová absorpční vrstva nebo kovové či nekovové prášky) nebo lze použít „poškození povrchu laserem“. Mimo to, že je z dané tabulky patrný vliv drsnosti povrchu na absorpci paprsku, můžeme vypožorovat vliv vlnové délky na absorpci. Vliv drsnosti povrchu na absorpci lze logicky vysvětlit reflexí paprsku při kontaktu s povrchem materiálu. Na reflexi má vliv chemického složení svařovaného materiálu a vlnová délka paprsku (*Tab. 2.3*). <sup>[15][19]</sup>

Stav povrchu	Ra [μm]	Absorpce CO <sub>2</sub> laseru [%] λ = 10,6 μm	Absorpce CO laseru [%] λ = 5,5 μm	Absorpce YAG laseru [%] λ = 1,06 μm
Leštěný	0,02	5,15 ÷ 5,25	8,55 ÷ 8,7	29,75 ÷ 30,0
Broušený	0,21	7,45 ÷ 7,55	12,85 ÷ 12,95	38,90 ÷ 40,1
Válcovaný	0,87	5,95 ÷ 6,05	10,15 ÷ 10,35	33,80 ÷ 34,20
Válcovaný	2,05	8,10 ÷ 8,25	13,50 ÷ 13,70	41,80 ÷ 42,50
Válcovaný	3,35	12,55 ÷ 12,65	21,35 ÷ 21,50	51,40 ÷ 51,70
Pískovaný	1,65	33,85 ÷ 34,30	42,40 ÷ 42,80	68,20 ÷ 68,40

**Tab. 2.2** Součinitel absorpce nízkolegované oceli v závislosti na stavu povrchu materiálu <sup>[18]</sup>

Materiál	Vlnová délka $\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]		
	0,7	1,06	10,6
Hliník	0,87	0,93	0,97
Chrom	0,56	0,58	0,93
Měď	0,82	0,91	0,98
Nikl	0,68	0,75	0,95
Stříbro	0,95	0,97	0,99
Ocel	0,58	0,63	0,93

**Tab. 2.3** Součinitel reflexe u vybraných kovů <sup>[19]</sup>

### 2.4.1 Materiály vhodné pro laserové svařování

Laserovým svařováním lze, hlavně díky svým specifickým vlastnostem vzniku svarového spoje, svařovat nepřeberné množství druhů materiálů a jejich kombinací. Ne všechny materiály jsou pro nás ve strojírenské výrobě zajímavé. Nejvýznamnějšími stále zůstávají oceli a hliník a jeho slitiny. <sup>[15]</sup>

#### Konstrukční uhlíkové a nízkouhlíkové oceli

Jedná se o konstrukční materiály širokého okruhu použití s obsahem uhlíku 0,25 % u konstrukčních ocelí a 0,4 % u nízkouhlíkových ocelí. Běžně používanými metodami svařování jsou tyto oceli většinou dobře svařitelné. Použitím laserového svařování získáme ve svarovém spoji výhodnou jemnozrnnou strukturu. Doporučuje se používat vysokou rychlost svařování (30 až 40 mm·s<sup>-1</sup>), čímž se zvýší odolnost oceli k tvorbě teplejších a studených trhlin a také se zvýší produktivita svařování. Mechanické vlastnosti po svařování bývají podobné hodnotám ZM. <sup>[15]</sup>

#### Konstrukční středně a vysokouhlíkové a legované oceli

U těchto ocelí je typická tvorba kalicích struktur při svařování, náchylných na křehké lomy, tvorbou teplejších a studených trhlin a pórů. Použitím laserového svařování, v porovnání s obloukovými metodami, jsme schopni zajistit vyšší odolnost SK k tvorbě horkých trhlin (použitím svařovací rychlosti vyšší než 30 mm·s<sup>-1</sup>). Ve většině případů se tím i zvyšuje odolnost proti tvorbě studených trhlin. Vrubová houževnatost spoje dosahuje dokonce podstatně vyšších hodnot než u ZM, což je dáno hlavně značným zjemněním struktury v

oblasti SK a TOO. Rovněž je možné dosáhnout lepších mechanických vlastností spoje a to hlavně minimální ztráty pevnosti v TOO a většinou i vyšší pevnosti spoje o 12 až 15 % oproti obloukovému svařování. U svařování uhlíkových a legovaných kalitelných ocelí mívá SK výhodnější strukturu a chemické složení než ZM. <sup>[15]</sup>

### **Vysokolegované oceli**

Problémem svařování těchto ocelí je v náchylnosti na vznik horkých trhlin ve SK a TOO což je zapříčiněno do značné míry vznikem hrubozrnné struktury a jinými aspekty. Použitím laserového svařování nám v mnohých případech umožňuje zabezpečit odolnost spoje proti horkým trhlínám a to hlavně podporou vzniku jemnozrnné struktury,  $\delta$ -feritu a minimalizací obsahu příměsí tvořících ve SK nízkotavitelné eutektikum. Dále nám výrazně zvyšuje odolnost proti vzniku studených trhlin. Mechanické vlastnosti spojů jsou v porovnání s obloukovým svařováním všeobecně lepší. Velmi vhodné je laserové svařování použít při svařování martenzitických nerezavějících ocelí, kde máme běžně problém s korozním praskáním a mezikrystalickou korozi. Oproti obloukovým metodám zde získáváme výrazně vyšší (2 až 3 krát) korozní odolnost. To je dáno snížením výdrže svarové lázně na kritické teplotě pod 1 sekundu (při rychlosti svařování nad  $35 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ). <sup>[15]</sup>

### **Hliník a jeho slitiny**

Svařování hliníku a jeho slitin má svá specifika. Hlavními problémy jsou jeho vysoká tepelná vodivost a koeficient tepelné roztažnosti, intenzivní oxidace při teplotě tavení a tvorba pórů v SK. Oxidická vrstva má teplotu tavení nad  $2000^\circ\text{C}$ , která je obtížně tavitelná a její části nám mohou vnikat do SK. Použitím laserového svařování je možné mnohé tyto problémy vyřešit. V první řadě je třeba zajistit důkladnou plynovou ochranu svarové lázně před oxidací, k čemuž se doporučuje hlavně He. Největší vliv zde mají správně nastavené svařovací parametry. Při optimálních parametrech je mikrostruktura SK výrazně odlišná od struktury získané při obloukovém svařování. SK má nízkodisperzní strukturu s menší velikostí dendritů, než u obloukového svařování, a neobsahuje nízkotavitelná eutektika. Strukturní změny probíhají v 5 až 6 krát menším objemu než u obloukového svařování. Zrno kovu je zvětšeno jen minimálně. Taková struktura je výhodná hlavně svými dobrými mechanickými vlastnostmi a odolností proti horkým trhlínám. <sup>[15]</sup>

## **Titan a jeho slitiny**

Problémem titanu a jeho slitin při svařování je jeho vysoká chemická aktivita. V oblasti teploty tavení má vysokou afinitu k  $O_2$  a  $H_2$ . Vodík způsobuje v SK zvýšenou náchylnost na vznik studených trhlin. Titanové slitiny jsou navíc náchylné na růst zrna při vysokých teplotách. Svařování s vnesením minimálního tepla, které umožňuje laserové svařování, nám dokáže vyřešit některé z těchto problémů. Zlepšení vlastností spoje nám pomůže důkladná ochrana svarové lázně při svařování i při jeho chladnutí do teplot 400 až 500 °C. Použitím vysoké rychlosti svařování (nad  $25 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) docílíme rychlého ochlazování SK, které vede k podstatnému zjemnění zrna kovu v okolí svaru. <sup>[15]</sup>

## **Speciální slitiny**

Laserové svařování, se díky svým jedinečným vlastnostem a vysoké produktivitě, používá i pro svařování speciálních slitin materiálů, například v elektronice, zdravotnictví a jiných odvětvích. Ve zdravotnictví je rozšířen hlavně do oblasti zubní protetiky, kde svařujeme zlaté slitiny s Cr-Ni nebo Cr-Co slitinami. Díky dobré kontrole nad vneseným teplem do svarového spoje je, oproti předchozímu pájení, možné svařovat materiály, aniž by bylo potřeba odstraňovat pryskyřici či keramiku z přilehlých míst. V elektronice je možné takto nahradit pájené spoje elektronických součástek spoji svařovanými, což má pozitivní vliv hlavně na produktivitu a životnost spoje. <sup>[1]</sup>

## **Nekovové materiály**

V této skupině se metoda 52 rozšířila hlavně do oblasti svařování plastů, a to hlavně na svařování termoplastů a termoplastických elastomerů. Za určitých podmínek je možné svařovat i jiné druhy plastů. Své značné rozšíření si metoda získala hlavně díky vysoké kvalitě svaru a minimální degradaci svařované součásti, produktivitě, vzhledu svaru, možnosti svařování za vysokých teplot a dobré kontrole nad vneseným teplem. Je možné svařovat i propustným svařováním, což dnes nahrazuje lepení těchto součástí. Metoda 52 je již velmi důležitou metodou v oblasti svařování plastů a pro určité aplikace svařování je to jediný možný způsob spojování materiálů. <sup>[22]</sup>

I v oblasti svařování keramiky má tato metoda svůj potenciál. K tomuto účelu bylo zkonstruováno experimentální laserové svařování.

U metody 52 lze předpokládat, že bude použita i ke svařování mnoha jiných druhů materiálů.

### Heterogenní spoje

Heterogenní spoje mohou vznikat podle dvou hlavních faktorů. První je pomocí vzájemné difuze svařovaných materiálů, která je závislá hlavně na chemickém složení materiálů, času a teplotě vzájemného působení. Druhým je mechanické promísení svařovaných materiálů, které probíhá zejména pomocí hydrodynamických procesů ve svarové lázni. <sup>[15]</sup>

	W	Ta	Mo	Cr	Co	Ti	Be	Fe	Pt	Ni	Pd	Cu	Au	Ag	Mg	Al	Zn	Cd	Pb
Sn	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	5	4	4	5	5	5	5	4
Pb	5		5	5	5	5		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
Cd				5	5	5		5	4	4	4	5	4	3	2	5	5		
Zn	5		5	5	4	5	5	4	5	4	4	3	4	3	5	4			
Al	5	5	5	5	4	4	5	4	5	4	5	4	4	4	4				
Mg	5		5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4					
Ag	5	5	5	5	5	4	5	5	4	5	2	4	2						
Au			5	4	5	4	4	4	2	2	2	2							
Cu	5	5	5	5	4	4	4	4	2	2	2								
Pd	4	3	3	3	2	4	4	3	2	2									
Ni	4	3	4	3	2	4	4	3	2										
Pt	3	4	3	3	2	4	5	3											
Fe	4	4	3	2	2	4	4												
Be	5	5	5	5	4	5													
Ti	4	2	2	3	4														
Co	4	5	4	3															
Cr	2	5	2																
Mo	2	2																	
Ta	2																		

2 - velmi dobrá

3 - dobrá

4 - částečná

5 - špatná

**Tab. 2.4** Svařitelnost kombinací vybraných kovových materiálů laserovým svařováním <sup>[15]</sup>

## **2.5 Parametry svařování**

Parametry svařování jednoznačně ovlivňují kvalitu svarového spoje. Parametry podmiňují efektivnost využití laseru na technologický proces. Parametry rozdělujeme zejména na parametry výkonové, zaostřovacího systému a pomocné. Dále je můžeme dělit podle režimu svařování na parametry kontinuálního a pulzního svařování, popř. na parametry navařování.

Svařovací parametry pro laserové svařování předepsané normou ČSN EN ISO 15609-4: <sup>[20]</sup>

### **Parametry svazku**

- Výkon laserového svazku na výrobku
- Parametry pulzu, pokud je pulzace používána: špičkový výkon; energie pulzu; opakovací frekvence; délka pulzu; tvar pulzu
- Detail náběhu a snižování výkonu, pokud je použito
- Detaily stehování
- Diagram pulzace: amplituda, frekvence a čas prodlevy (pokud je použito)
- Orientace laserového svazku, polarizace a poloha vzhledem ke spoji a směru svařování: úhel (ve dvou směrech); poloha v příčném směru (pokud je to vhodné)

### **Mechanické parametry**

- Rychlost pohybu
- Rychlost pohybu s detaily zrychlení a zpomalení, pokud je to nutné
- Rychlost podávání přídavného drátu, směr, poloha a úhel



## **Parametry odstraňování plazmy, ochranného a formovacího plynu**

- Průtočné množství plynu
- Kontrola čistoty plynu
- Postup čištění plynu

## **Další parametry**

- Pracovní vzdálenost
- Tvar a rozměr svazku na výrobku
- Plocha a orientace trysky s ochranným plynem vzhledem k výrobku
- Šířka a výška jednotlivých vrstev (u navařování)
- Vzdálenost nebo procentuální vyjádření překrytí (u navařování)

Dále je třeba identifikovat svařovací zařízení, jelikož výsledný svarový spoj záleží i na mnohých jeho parametrech. Je zde třeba udat např. typ zdroje paprsku, jeho vlnovou délku, jakost a polarizaci, jmenovitý výkon zařízení, také i systém fokusace paprsku, odstraňování plazmatu, přívodu ochranného plynu a jiné údaje identifikující zařízení.

## **Výkon laserového svazku na výrobku**

Je jedním z nejdůležitějších parametrů svařování, jehož maximální hodnota je jedním z parametrů určující maximální tloušťku svařovaného materiálu. Hodnota výkonu se udává ve wattech, u svařování ocelí aj. materiálů v kilowattech. Hodnotu lze udávat také v procentech z maximálního výkonu laserového zařízení. <sup>[18][20]</sup>

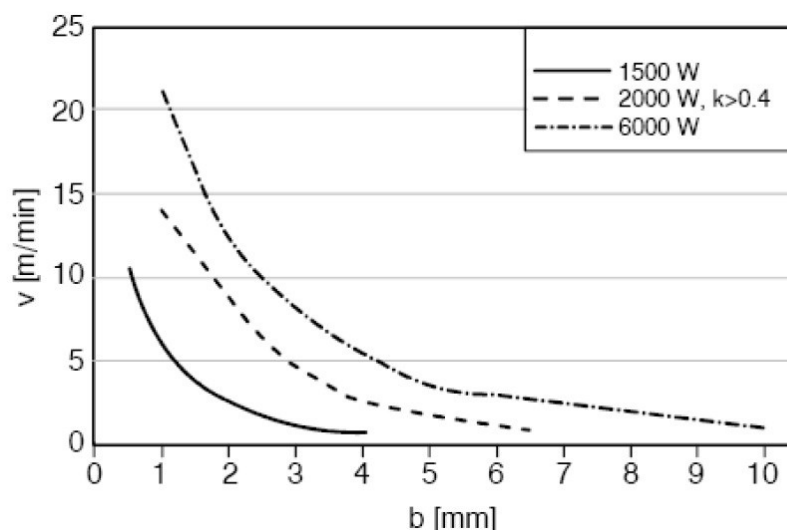
## **Parametry pulzu**

Jedná se o základní parametry pro pulzní svařování, mezi něž patří energie, délka, frekvence a špičkový výkon pulzu, případně průběh (tvar) pulzu. Energie pulzu je základní

energetická charakteristika ovlivňující proces svařování množstvím vneseného tepla do spoje a také některé další charakteristiky. Délka pulzu nám charakterizuje čas působení paprsku na materiál. Pro každý svařovaný materiál a jeho tloušťku existuje optimální interval délek pulzu, při kterém je možné vyrobit kvalitní svarový spoj bez výstřiku. <sup>[18][20]</sup>

### Rychlost pohybu

Jedná se o dráhu prošlou zdrojem ohřevu svařovaného materiálu za jednotku času. Při konstantní hodnotě výkonu charakterizuje množství vneseného tepla do spoje. Rychlost svařování ovlivňuje teplotní rozložení v materiálu. Do značné míry ovlivňuje geometrii svaru, vlastnosti, strukturu a chemické složení materiálu v TOO. <sup>[15][20]</sup>



**Obr. 2.15** Graf závislosti rychlosti svařování na hloubce průvaru pro různé výkony laserů <sup>[21]</sup>

### Průtočné množství plynu a jeho složení

Do procesu svařování nám může zasahovat několik druhů plynů a to plyny ochranné, plyny pro odstranění plazmatu a formovací plyny. Při přívodu nedostatečného množství plynu není zabezpečena dostatečná ochrana svarové lázně a sfoukávání plazmatu, který má nepříznivý vliv na hloubku průvaru. Naopak při nadbytečném množství dochází k zbytečným ekonomickým ztrátám. Proto je třeba použít optimální množství plynu. Jako ochranné plyny používáme Ar, He, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> nebo směsi plynů Ar, He, CO<sub>2</sub>. Při svařování vysokými výkony je rovněž třeba zajistit ochranu před tvorbou plazmatu ochranného plynu nad místem svařování, která nám nepříznivě ovlivňuje hlavně hloubku průvaru. Ten potlačujeme

zvyšováním koncentrace He v plynu, což má i pozitivní vliv na rychlost svařování. Argon naopak vznik plazmatu podporuje. Dalším významným parametrem je nastavení plynové trysky, pro kterou stále neexistují žádná pravidla a obsluha ji nastavuje dle vlastních zkušeností. Nejlepších výsledků bývá dosahováno při použití He, který je však ze všech uvedených ochranných plynů nejdražší a má velmi malou hustotu. Aplikace ochranné atmosféry není nutná ve všech případech, např. při svařování plastů, tenkých plechů aj. [15][18][20]

Složení plynu	Průtočné množství plynu [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
100% He	$(53 \div 60) \cdot 10^{-5}$
50% He + 50% Ar	$(46 \div 53) \cdot 10^{-5}$
100% Ar	$(13 \div 20) \cdot 10^{-5}$

**Tab. 2.4** Doporučené průtočné množství plynů <sup>[15]</sup>

### Pracovní vzdálenost

Jedná se nejčastěji o vzdálenost mezi ohniskem výstupního laserového paprsku a čelem svařovaného materiálu. Poloha ohniska může být nad, na nebo pod čelem svařovaného materiálu, čímž měníme hlavně velikost dopadajícího paprsku na čelo materiálu. Čím je menší (nejmenší je v ohnisku), tím větší hustotu energie na povrchu dosáhneme. Takto jsme schopni ovlivňovat hlavně hloubku průvaru. <sup>[15][20]</sup>

## 2.3.4 Výhody a nevýhody laserového svařování

### Výhody <sup>[1]</sup>

- Vysoká produktivita procesu a bez aplikace přídavného materiálu
- Úzký svar s hlubokou průvaru až 50 mm a šířce několika mm
- Malé množství vneseného tepla do svarového spoje a nízká deformace součástí
- Přesně nastavitelná hustota vnesené energie do svarového spoje

- Svarový kov vysoké jakosti, bez možnosti znečištění materiálem elektrod
- Možnost svařovat ve velmi obtížně dostupných místech
- Svařitelnost velkého množství druhů materiálů a jejich kombinací
- Snadná automatizace procesu
- Možnost svařování bez ochranné atmosféry u svařování tenkých plechů

#### **Nevýhody**<sup>[1]</sup>

- Vysoké pořizovací a provozní náklady svařovacího zařízení (stále se ale snižují)
- Nízká mobilita a flexibilita svařovacího zařízení
- Nutnost důkladného opracování a ustavení svarových ploch vůči sobě

### **3. Experimentální část**

Studiem mikrostruktury svarových spojů doplněným o profil mikrotvrdosti získáme přehled o strukturních změnách a materiálových pochodech v oblasti svarového spoje při jeho výrobě a chladnutí, popř. po tepelném zpracování po svařování. Jedná se o jedny z nejdůležitějších zkoušek svarových spojů.

#### **3.1 Popis experimentální aparatury**

##### **3.1.1 Zkoušky mikrotvrdosti svarových spojů**

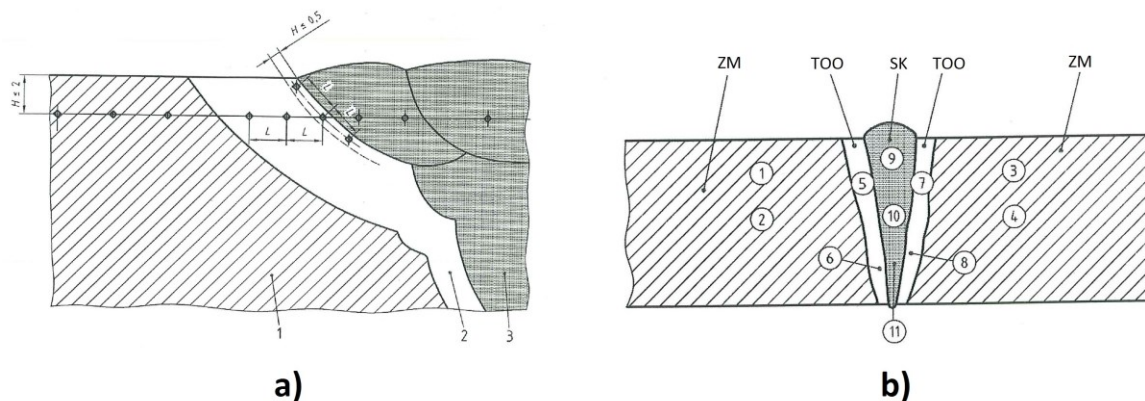
V principu se jedná o statické metody měření tvrdosti s rozdílem, že jsou aplikovány s velmi nízkými přitlačnými silami působícími na indukční tělísko. Se snížením zatěžujících sil se nám také zmenšuje velikost vtisku, čímž se tato metoda stává vhodná i pro hodnocení svarových spojů s velmi úzkou TOO.

K účelům měření mikrotvrdosti svarových spojů se používají metody podle Vickerse - HV. Jedná se o metodu, kde se jako indenter používá diamantové těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu s čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem  $(136 \pm 0,5)^\circ$ , měřeným mezi protilehlými stěnami. Indenter je do tělesa vtlačován definovanou silou  $F$  a definovanou rychlostí vtlačování a dobou setrvání v materiálu. Pro vyhodnocení tvrdosti materiálu se měří aritmetický průměr úhlopříček vtisku zanechaných indentorem. Tvrdosti stanovíme z tabulek uvedených v normě ČSN EN ISO 6507-4 nebo je vypočteme.

Zkušební vzorek se připravuje mechanickým řezáním, zpravidla příčně na svarový spoj. Následuje jeho broušení a úprava povrchu tak, aby byly zřetelné jednotlivé oblasti svarového spoje a mohly být v nich přesně změřitelné úhlopříčky vtisků indentoru, k čemuž se používá i leptání povrchu. Pokud není stanoveno jinak, zkouška se musí provádět za teploty  $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ . Rozlišujeme dva druhy zkušebních postupů. Zkušebním postupem *řadou vtisků* ( $R$ ) se vyhodnocuje průběh tvrdosti v řadě napříč oblastmi svarového spoje. Počet a umístění vtisků musí být dostatečné pro určení oblastí se sníženou nebo zvýšenou tvrdostí materiálu vzniklé

v důsledku procesu svařování. U zkušebního postupu *jednotlivými vtisky (E)* se vtisky umísťují do jednotlivých oblastí svarového spoje. [23]

Stanovení postupů a kvalifikace svařování kovových materiálů metodou 52 se provádějí podle normy ČSN EN ISO 15614-11. Metodika zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů provedených metodou 52 se provádí podle normy ISO 22826. Zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti podle Vickerse se provádí dle normy ČSN EN ISO 6507-1.



**Obr. 3.1** a) Příklad zkušebního postupu řadou vtisků b) Příklad zkušebního postupu jednotlivými vtisky (1 ÷ 11 Označení pozic jednotlivých vtisků) [23]

### Zkušební zařízení

Profil mikrotvrdosti svarového spoje byl stanoven metodou podle Vickerse při zatížení  $1,9610\text{ N}$  pro HV0,2,  $0,9807\text{ N}$  pro HV0,1 a  $0,4903\text{ N}$  pro HV0,05. Hodnoty mikrotvrdosti HV0,2 byly získány na mikrotvrdoměru LECO AMH 43 a vtisky byly umístěny v linii přes celou šířku svarového spoje. Mikrotvrdosti HV0,1 a HV0,05 byly získány na světelném mikroskopu Olympus 50CX vybaveném modulem pro měření mikrotvrdosti. Vtisky zde byly umístěny od středu svarového spoje až do ZM. Zkoušky byly prováděny na vzorcích v naleptaném stavu, z nichž byly získány kromě hodnot mikrotvrdostí i snímky makrostruktury v naleptaném stavu.

## 3.1.2 Elektronová mikroskopie

Elektronová mikroskopie vychází z principu optické mikroskopie s rozdílem v tom, že byly fotony nahrazeny elektrony, díky čemuž můžeme dosáhnout až několikatisíci násobně

vyššího zvětšení oproti optickým mikroskopům. Hlavní změna v zařízení je náhrada optických čoček za čočky elektromagnetické a aplikace vakua v zařízení i pracovní komory mikroskopu.

Elektronový paprsek vzniká v elektronovém děle a následně dále je usměřován v prostředí vakua pomocí elektromagnetických cívek na povrch pozorovaného materiálu. Na tento povrch dopadající primární elektronový paprsek interaguje za vzniku sekundárních, prošlých, absorbovaných a odražených elektronů a jiných záření. Pro různé metody tvorby obrazu a analýzy vzorku se používají různé produkty interakce paprsku se zkoumaným vzorkem. [24]



**Obr. 3.2** Schéma interakce svazku elektronů s preparátem [25]

### Transmisní elektronová mikroskopie

U transmisní elektronové mikroskopie (TEM – Transmission Electron Microscopy) se pro získání obrazu vnitřní struktury vzorku používají prošlé elektrony. Touto metodou lze získat obraz struktury materiálu s rozlišovací schopností až 0,1 nm (až do atomárního rozlišení).

Při prozařování preparátu jsou prošlé elektrony zpracovávány elektromagnetickými čočkami a následně snímány na fluorescenční stínítko nebo pomocí CCD kamery. Elektrony, které nejsou zobrazeny na stínítku či kameře tvoří amplitudový kontrast. Dále je možné snímat fázový kontrast, který vzniká díky odchýlení drah elektronů.

Zkušební vzorky se zhotovují ve formě extrakčních otisků nebo tenkých folií. Extrakční otisky jsou tvořeny tenkým uhlíkovým filmem, na kterém jsou zachyceny precipitáty vyražené z naleptaného povrchu zkoumaného vzorku. Tyto otisky jsou užitečné zejména při

analýze precipitačních reakcí v materiálu. Tenké folie představují velmi tenký (cca  $100 \div 150$  nm) disk získaný ze zkoušeného materiálu. Tenké folie umožňují charakterizovat strukturu materiálu, interakci dislokací, atd. [24]

### **Rastrovací elektronová mikroskopie**

U této metody (SEM – Scanning Electron Microscopy) se k získání obrazu používají odražené a sekundární elektrony. Metodu používáme k získávání topografie povrchu zkoumaného vzorku s rozlišovací schopností až 1 nm.

Sekundární nebo odražené elektrony jsou snímány pomocí detektorů a je u nich měřena intenzita signálu. Intenzita v jednotlivých místech povrchu je závislá na jeho topografii a chemickém složení povrchu v daném místě. Detekcí elektronů a jejich energií získáme materiálový a topografický kontrast.

Příprava vzorku k pozorování se provádí stejně, jako u světelné mikroskopie nebo se mohou používat v nezpracovaném stavu, jako je tomu např. ve fraktografii. [24]

### **Difrakce zpětně odražených elektronů**

Pomocí metody difrakcí zpětně odražených elektronů (EBSD – Electron Backscatter Diffraction) jsme ze vzorku schopni získat krystalografická data, jako jsou např. mapování orientace zrn v povrchové vrstvě vzorku, identifikace přítomných fází, aj.

Jedná se o metodu založenou na analýze Kikuchiho linií, které vystupují ze silně nakloněného vzorku v důsledku interakce elektronového paprsku s podpovrchovou vrstvou vzorku. Tyto zpětně odražené elektrony nám na fluorescenčním stínítku tvoří Kikuchiho linie, které jsou dále ze stínítka snímány CCD kamerou, čímž získáme digitalizovaný difraktogram. Pomocí počítačové techniky jsou difraktogramy analyzovány, je z nich tvořen záznam orientačních dat, aj. data. Touto metodou lze získat mapy inverzního pólového obrazce aj. zobrazení. [24]

### **Energiově disperzní spektroskopie**

Metoda se anglicky označuje jako: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX). Jedná se o metodu lokální analýzy chemického složení materiálu založené na vyhodnocování



energie rentgenových fotonů vzniklých interakcí elektronového paprsku s povrchem zkoumaného materiálu.

Rentgenové fotony dopadají na polovodičový detektor, z kterého je dále elektronicky zpracováván a přiřazován do jednotlivých energetických kanálů. U kvalitativní analýzy jsou na základě charakteristické energie jednotlivých chemických prvků přiřazeny rentgenové linie chemického složení materiálů. Na základě počtu pulsů v jednotlivých rentgenových liniích je možné určit kvantitativní složení. Touto metodou lze zjišťovat chemické složení z mikroobjemu několika mála  $\mu\text{m}^3$ . [24]

### **Zkušební zařízení**

Hodnocení mikrostruktury vzorků metodou SEM bylo prováděno na řádkovacím elektronovém mikroskopu Quanta 450. Mikrostruktura byla zdokumentována v režimu detekce sekundárních elektronů, u některých snímků byly použity i odražené elektrony. Orientace jednotlivých zrn byla získána na stejném zařízení pomocí techniky EBSD. Chemické složení jednotlivých nekovových vměstků bylo stanoveno za pomoci techniky EDX.

Studium minoritních fází (precipitátů) ve vzorcích bylo prováděnou TEM na prozařovacím elektronovém mikroskopu JEOL 2100 s použitím extrakčních uhlíkových otisků. Fáze byly identifikovány za použití kombinace EDX mikroanalýzy a elektronové difrakce.

## **3.1.3 Spektrální analýza chemického složení**

Spektrální analýzou zjišťujeme chemické popř. strukturální složení zkoumaného materiálu. Jedná se o skupinu metod, která funguje na principu zkoumání interakce elektromagnetického záření se vzorkem.

### **Optická emisní spektrometrie**

Tato metoda (OES – Optical Emission Spectroscopy) rozboru chemického složení vzorku, funguje na principu registrace fotonů vzniklých při přechodu elektronů z vyšších

energetických stavů na nižší. Měřeno je záření emitovaných atomů nebo ionty v excitovaném stavu. Excitace do vyšších energetických stavů se nejčastěji provádí termicky (plamenem, elektrickým obloukem či jiskrou, plazmatem, aj.).

### **Rentgenový fluorescence**

Rentgenová fluorescence (XRF – X-ray Fluorescence) je metoda nedestruktivního bezkontaktního zkoumání chemického složení materiálu. Metoda funguje na principu identifikace atomů pomocí fluorescenčního spektra získaného interakcí atomů zkoumaného materiálu s rentgenovým zářením. Standardně jsou touto metodou identifikovatelné prvky s protonovým číslem 11 až 92, mezi něž nepatří např. C, N, O, aj.

### **Zkušební zařízení**

Rozbory chemického složení vzorků metodou OES bylo provedeno na jiskrovém spektrometru SPECTROLAB SPECTRO 2000 při použití grafitových elektrod  $\varnothing$  15 mm. Tato metoda byla použita u materiálů, kde bylo třeba zjistit i obsah uhlíku (vzorky L5 – ocel, L6, L7).

Při rozboru chemického složení rentgenovou spektrometrií (XRF) bylo použito zařízení Niton XL3t GOLDD+. Tato metoda byla použita při analýze chemického složení slinutého karbidu. Byla zde použita metoda „small spot“ s paprskem  $\varnothing$  3 mm.

## **3.2 Popis zkušebních vzorků**

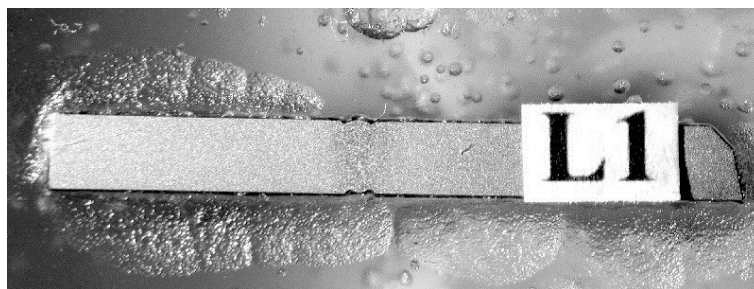
### **3.2.1 Vzorky**

#### **Vzorek L1**

Jedná se o I svarový spoj o tloušťce 2 mm vyrobený z konstrukční jemnozrnné oceli známé pod firemním označením DOMEX 420 MC D. Spoj byl vyroben metodou 52 při použití Yb:YAG vláknového laserového svařovacího zařízení.

*Při svařování byly použity tyto svařovací parametry:*

Výkon laserového paprsku	1,6 kW
Rychlost svařování	40 mm·s <sup>-1</sup>
Poloha ohniska	0 mm (na čele svařovaného materiálu)
Ochranný plyn - Argon	12 l·min <sup>-1</sup>



**Obr. 3.3** Makrostruktura vzorku L1 – zvětšení 5 x

### **Vzorek L2**

Jedná se o I svarový spoj o tloušťce 4 mm vyrobený z konstrukční jemnozrné oceli známé pod firemním označením DOMEX 700 MC. Spoj byl vyroben metodou 52 při použití Yb:YAG vláknového laserového svařovacího zařízení.

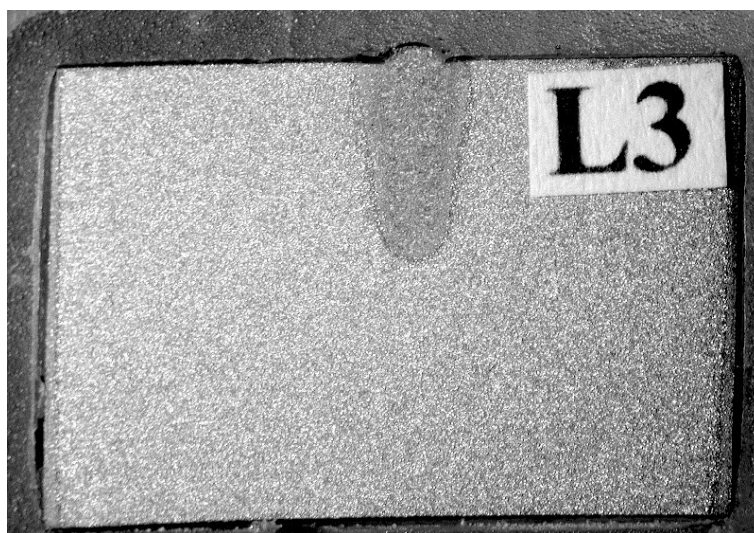
**Tento vzorek nebyl nakonec použit pro následující experiment, jelikož je svými vlastnostmi velice podobný vzorku L1.**

### **Vzorek L3**

Jedná se o průvar materiálu o tloušťce 10 mm s hloubkou průvaru přibližně 4 mm, vyrobený z konstrukční oceli značené dle ČSN EN 10027-1 jako ocel S235JRG2. Spoj byl vyroben metodou 52 při použití Yb:YAG vláknového laserového svařovacího zařízení.

*Při svařování byly použity tyto svařovací parametry:*

Výkon laserového paprsku	2,0 kW
Rychlost svařování	17 mm·s <sup>-1</sup>
Poloha ohniska	2 mm nad čelem svařovaného materiálu
Ochranný plyn - Argon	12 l·min <sup>-1</sup>



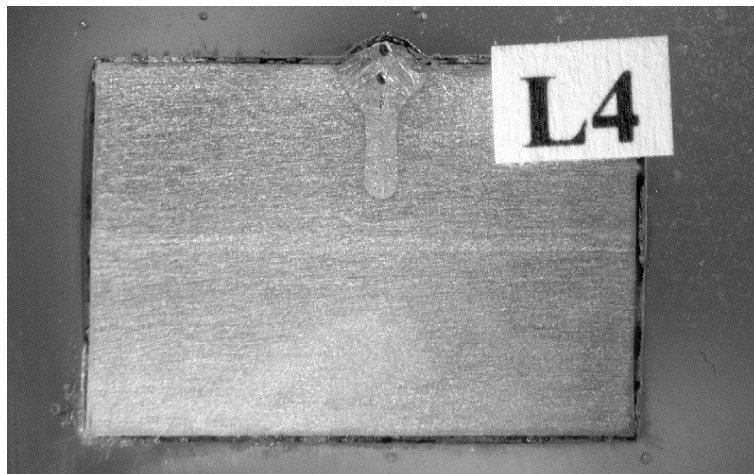
**Obr. 3.4** Makrostruktura vzorku L3 – zvětšení 5 x

#### **Vzorek L4**

Jedná se o průvar materiálu o tloušťce 10 mm s hloubkou průvaru přibližně 3,5 mm, vyrobený z austenitické oceli značené dle ČSN EN 10027-1 jako ocel X4CrNi18-12. Spoj byl vyroben metodou 52 při použití Yb:YAG vláknového laserového svařovacího zařízení.

*Při svařování byly použity tyto svařovací parametry:*

Výkon laserového paprsku	2,0 kW
Rychlost svařování	17 mm·s <sup>-1</sup>
Poloha ohniska	2 mm nad čelem svařovaného materiálu
Ochranný plyn - Argon	12 l·min <sup>-1</sup>



**Obr. 3.5** Makrostruktura vzorku L4 – zvětšení 5 x

### **Vzorek L5**

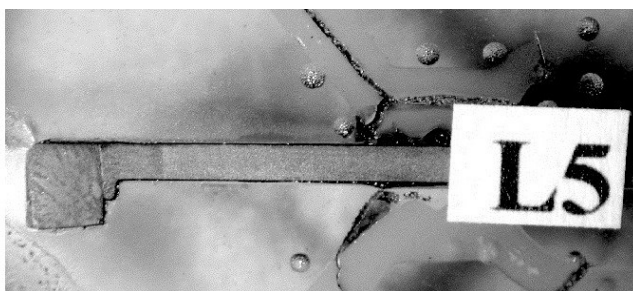
Jedná se o I heterogenní svarový spoj dvou materiálů velice odlišných vlastností a struktury. Svarový spoj byl vyroben metodou 52, přivařením zubu ze slinutého karbidu tloušťky 2 mm na pás konstrukční oceli tloušťky 1 mm. Další údaje o daném vzorku nebo parametry svařování nám u tohoto vzorku nebyly známy.

Za pomoci studia mikrostruktury metodou SEM bylo zjištěno, že je ocel zušlechťená. Následně jsme provedli rozbor chemického složení metodou OES a s použitím softwarové databáze strojírenských materiálů (Stahlschlüssel 2010) jsme vyhledali materiál s totožným chemickým složením. Jedná se o zušlechťenou ocel L555QB. U našeho vzorku bylo detekováno pouze zvýšené množství  $N_2$  o 0,02%, než je maximální hodnota v této oceli.

U zubu ze slinutého karbidu jsme si studiem mikrostruktury a pomocí EDX ověřili, že se jedná opravdu o karbidickou strukturu ve složení WC a NbC. Pomocí XRF jsme kvantifikovali chemické složení na W = 83 %, Co = 13 % a další prvky. Tato struktura a chemické složení odpovídá slinutým karbidům K40 (označení dle ISO).



a)



b)

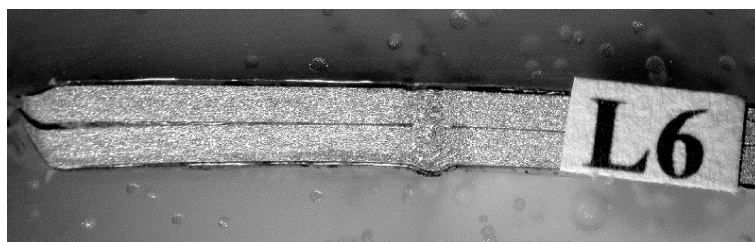
**Obr. 3.6** Makrostruktura vzorku L5

a) čelní pohled na vzorek, b) makrostruktura v místě řezu vzorku – zvětšení 5 x

### Vzorek L6

Tento vzorek byl svařen metodou 52 za použití přeplátovaného svarového spoje. Svarový spoj byl určen pro aplikaci v automobilním průmyslu a skládá se ze dvou pozinkovaných plechů tloušťky 1 mm. Další údaje k tomuto vzorku nám nebyly známy.

U daného vzorku byl proveden rozbor chemického složení pomocí metody EOD, ze kterého vyplývá, že se ocel skládá přibližně z 99 % Fe, 0,05 % C, 0,2 % Mn, 0,1 % Al a velmi malého množství jiných prvků. Po diskuzi a po přihlédnutí k mikrostruktuře svarového spoje jsme s Prof. Ing. Vlastimilem Vodárkem, CSc. z Katedry materiálového inženýrství na VŠB-TUO usoudili, že se nejedná o ocel ze skupiny „automobilových ocelí“ (BH oceli, IF oceli, izotropní oceli, aj.), ale že se jedná o hlubokotažnou ocel DC04, jejímž českým ekvivalentem je ocel 11 305, u jehož složení je definováno i množství Al a Si. Chemické složení vzorku je v limitních hodnotách ocelí 11 305, rovněž i DC04.

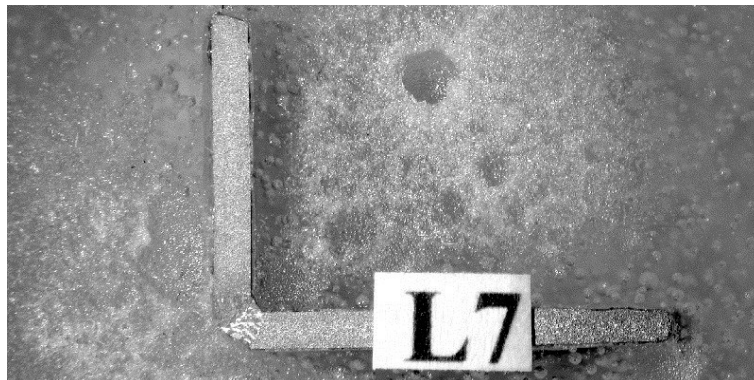


**Obr. 3.7** Makrostruktura vzorku L6 – zvětšení 5 x

### Vzorek L7

Jedná se o rohový svar provedený metodou 52 svařením dvou plechů nerezavějící oceli tloušťky 1 mm. Další údaje o tomto vzorku a jeho výrobě nejsou známy.

Vzorek byl podroben EOD analýze chemického složení, na jejichž základě a na základě přihlédnutí k mikrostruktuře svarového spoje byla ocel identifikovaná jako feritická korozivzdorná ocel X6Cr13. Chemické složení vzorku je v rozmezí limitních hodnot dané oceli.



**Obr. 3.8** Makrostruktura vzorku L7 – zvětšení 5 x

### **3.2.2 Vlastnosti materiálů**

#### ***Ocel DOMEX 420 MC D***

Tuto ocel vyrábí firma SSAB Tunnpłat a svým složením a vlastnostmi vychází z ocelí S355J2 a S355J2G3 s důrazem na zlepšení vlastností svařitelnosti a formovatelnosti materiálu. Tato konstrukční ocel má jemnozrnnou strukturu. Kromě použití na svařované konstrukce je tato ocel také rozšířena v automobilovém průmyslu, při použití pro lisované a tvářené části. [26]

Ocel je dobře svařitelná. Předehřev materiálu před svařováním není doporučený. S rostoucí tloušťkou materiálu se zvyšuje uhlíkový ekvivalent materiálu a s ním se zvyšuje nebezpečí vzniku studených trhlin.

*Základní mechanické vlastnosti oceli:*

$$R_m = (480 \div 620) \text{ MPa}$$

$$R_{eH} = 420 \text{ MPa}$$

$$A_{80} = 16 \% \quad (\text{pro tl. materiálu do 3 mm})$$

$$A_5 = 20 \% \quad (\text{pro tl. materiálu nad 3 mm})$$

C max. [%]	Si max. [%]	Mn max. [%]	P max. [%]	S max. [%]	Al min. [%]	Nb max. [%]	V max. [%]	Ti max. [%]
0,10	0,03	1,50	0,025	0,010	0,015	0,09	0,20	0,15

**Tab. 3.1** Chemické složení oceli Domex 420 MC D <sup>[26]</sup>

### **Ocel S235JRG2**

Jedná se o nelegovanou jakostní konstrukční ocel, která je vhodná ke svařování. Používá se na součásti tavně svařovaných konstrukcí a strojů středních tloušťek, namáhaných staticky i dynamicky, pro součásti vyráběné z plechů, podélně svařované duté profily, tlakové nádoby pracující s omezeným přetlakem a teplotou do 300°C, součástí kované pro tepelné energetické zařízení apod. <sup>[27]</sup>

Ocel je svařitelná všemi běžnými metodami svařování. S rostoucí tloušťkou výrobku se zvyšuje hodnota uhlíkového ekvivalentu a tím se zvyšuje nebezpečí výskytu studených trhlin v oblasti svaru. <sup>[28]</sup>

C max. pro tloušťku v mm [%]			Mn max. [%]	Si max. [%]	P max. [%]	S max. [%]	N max. [%]
≤16	>16 ≤40	>40					
0,19	0,19	0,23	1,5	-	0,045	0,045	0,014

**Tab. 3.2** Chemické složení oceli S235JRG5 <sup>[28]</sup>

Tloušťka materiálu [mm]	≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤150	>150 ≤200	>200 ≤250
R <sub>eH min</sub> [MPa]	235	225	215	195	185	175		
R <sub>m</sub> [MPa]	360 ÷ 510					350 ÷ 500	340 ÷ 490	
A <sub>5</sub> [%]	26	25	24	22	21			

**Tab. 3.3** Mechanické vlastnosti oceli S235JRG5 <sup>[28]</sup>



### ***Ocel X4CrNi18-12***

Jedná se o nestabilizovanou austenitickou chromnikovou nerezavějící ocel, která má vynikající odolnost proti atmosférické a půdní korozi. Je vhodná i k použití v prostředí nízko koncentrovaných anorganických kyselin a slabých organických kyselin. Ocel lze dlouhodobě vystavit teplotám do 350° C. Nejčastěji se tato ocel používá v chemickém a potravinářském průmyslu, zdravotnictví a architektuře. [30]

Svařitelnost této oceli je běžnými metodami svařování zaručena. Ocel se svařuje bez předehřevu. Do tloušťky spoje asi 6 mm je odolná proti mezikrystalové korozi.

*Základní mechanické vlastnosti oceli:*

$$R_m = (520 \div 720) \text{ MPa}$$

$$R_{p\ 0,2} = (190 \div 220) \text{ MPa}$$

$$A_5 = 45 \%$$

C max. [%]	Si max. [%]	Mn max. [%]	P max. [%]	S max. [%]	Cr [%]	Ni [%]	N max. [%]
0,060	1,000	2,000	0,045	0,015	17 ÷ 19	11 ÷ 13	0,11

**Tab. 3.4** Chemické složení oceli X4CrNi18-12 [31]

### ***Ocel X6Cr13***

Jedná se o nerezavějící feritickou ocel odolávající atmosférické korozi. Je schopna odolávat i zředěné kyselině dusičné a některým slabým kyselinám ve studeném stavu. Do teploty 700 °C odolává žáru v nauhličeném a sirném prostředí. Ocel nemá odolnost proti mezikrystalové korozi. Nejvíce rozšířená je ocel v oblasti méně namáhaných dílů pro farmaceutický a potravinářský průmysl, díky svému lesku ve vyleštěném stavu i v architektuře. [28]

Svařitelnost oceli je podmíněná při použití teploty předehřevu (150 ÷ 300) °C. Ochlazování po svařování je doporučeno na vzduchu. Po svařování je doporučeno aplikovat normalizační žihání při teplotě 790 °C a výdrži na teplotě 4 hodiny.

*Základní mechanické vlastnosti oceli:*

$$R_m = (400 \div 600) \text{ MPa}$$

$$R_{p0,2} = (220 \div 240) \text{ MPa}$$

$$A = 19 \%$$

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	P [%]	S [%]
max. 0,08	max. 1,0	max. 1,0	12 ÷ 14	max. 0,04	max. 0,03

**Tab. 3.5** Chemické složení oceli X6Cr13 <sup>[29]</sup>

### **Ocel DC04**

Jedná se o uklidněnou hlubokotažnou ocel, která je dodávána ve stavu po rekryalizačním žhání. Ocel má dobrou svařitelnost. Je obzvláště vhodná pro tváření za studena. Používá se nejčastěji v hutním průmyslu (svařované trubky, profilové polotovary), strojírenství (díly ložisek, lisované profily) a v automobilovém průmyslu (výlisky, pozinkované díly karoserií).

*Základní mechanické vlastnosti oceli:*

$$R_m = (270 \div 350) \text{ MPa}$$

$$R_{eH} = (210 \div 220) \text{ MPa}$$

$$A = 40 \%$$

C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Si [%]	Al [%]
max. 0,08	max. 0,4	max. 0,03	max. 0,03	max. 0,03	min. 0,025

**Tab. 3.5** Chemické složení oceli DC04 (obsah Si a Al dle 11 305) <sup>[29]</sup>

### ***Ocel L555QB***

Jedná se o speciální ocel určenou pro výrobu trubek na potrubí pro transport hořlavých medií, speciálně pro trubky definované normou ČSN EN 10208-2 (třída B). Polotovary jsou dodávány v zušlechtěném stavu. Ocel je určena ke svařování.

*Základní mechanické vlastnosti oceli v zušlechtěném stavu:*

$$R_m = 625 \text{ MPa}$$

$$R_{t0,5} = (555 \div 675) \text{ MPa}$$

$$A = 18 \%$$

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Ni [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	N [%]	Nb [%]	Ti [%]	Al [%]	Cu [%]
max. 0,16	max. 0,45	max. 1,8	max. 0,6	max. 0,025	max. 0,02	max. 0,5	max. 0,35	max. 0,1	max. 0,012	max. 0,06	max. 0,06	0,015 ÷ 0,06	max. 0,25
V + Nb + Ti < 0,15 %													

**Tab. 3.4** Chemické složení oceli L555QB <sup>[29]</sup>

### ***Slinutý karbid K40***

Slinuté karbidy skupiny K jsou tvořeny karbidy WC s pojivem Co, karbidy TiC se zde nevyskytují. Používají se hlavně jako břity řezných nástrojů pro obrábění materiálů, které tvoří krátkou nebo drobivou třísku. <sup>[32]</sup>

Slinuté karbidy K40 se používají hlavně pro obrábění či řezání dřeva, lisovaných dřevěných hmot a neželezných kovů. Aplikace je na břity řezných nástrojů a také třeba na jádra velkých lisovacích a hlubokotažných lisovnic.

Svařování slinutých karbidů je zcela jedinečná záležitost, která se v dnešní době běžně nepoužívá. Běžný způsob spojení břitu ze slinutého karbidu s ocelovým nástrojem je pájením nebo lepením.

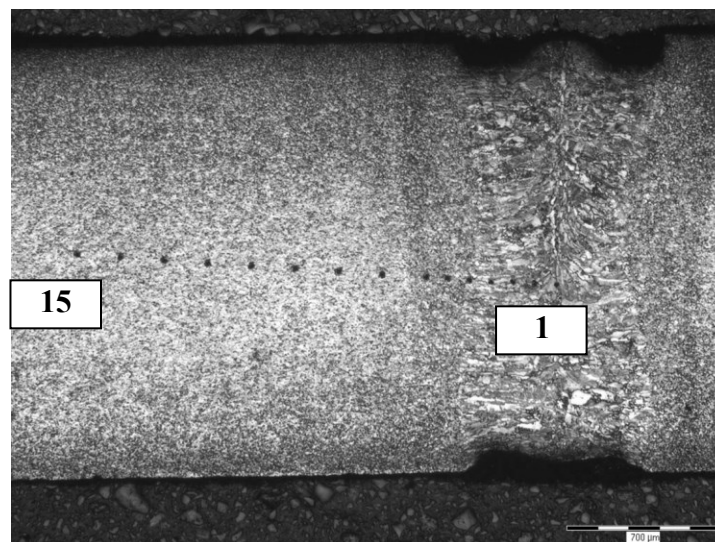
Co [%]	WC [%]	NbC [%]
11	88,5	0,5

**Tab. 3.6** Strukturní složení slinutého karbidu K40 <sup>[33]</sup>

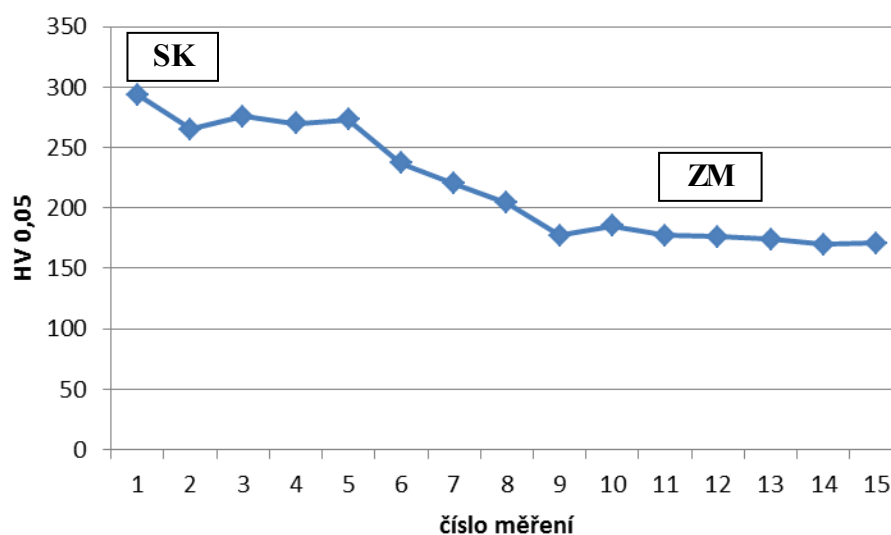
### 3.3 Výsledky experimentů

#### 3.3.1 Výsledky zkoušek vzorku L1

Z profilu mikrotvrdosti HV<sub>0,05</sub> (Obr. 3.10) je pozorovatelné, že tvrdost v oblasti SK je zvýšená přibližně o 100 HV<sub>0,05</sub>. Tvrdost ZM dosahuje hodnot přibližně 175 HV<sub>0,05</sub>. Tvrdost v TOO plynule roste ve směru do SK.

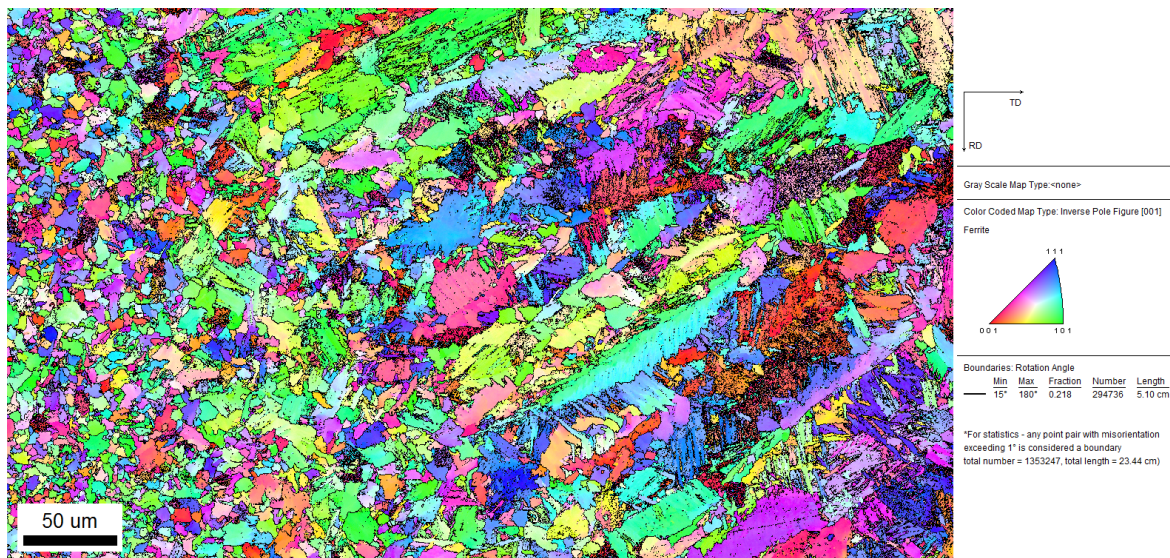


*Obr. 3.9* Makrovýbrus vzorku L1 s viditelnými vpichy indentoru



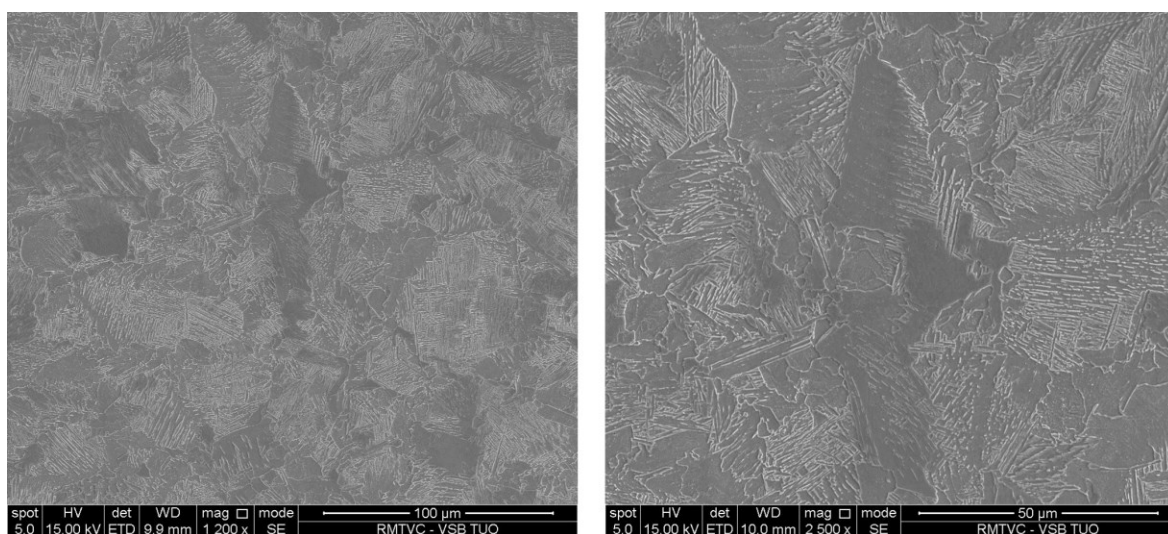
*Obr. 3.10* Profil mikrotvrdosti HV<sub>0,05</sub> vzorku L1

V oblasti TOO (*Obr. 3.11*) došlo k mírnému zhrubnutí zrna. Při tuhnutí SK došlo k zhrubnutí austenitického zrna a k jeho výraznému protažení ve směru odvodu tepla. TOO je široká přibližně 200  $\mu\text{m}$ . Jednotlivá zrna austenitu se při rychlém ochlazování svaru rozpadla a vzniklo z nich několik produktů rozpadu.



**Obr. 3.11** Mapa inverzního pólového obrazce pro směr ND s vysokoúhlovými hranicemi zrn ( $\alpha > 15^\circ$ ) v rozhraní TOO - SK

Mikrostruktura ve středu SK (*Obr. 3.12*) se u tohoto vzorku skládá ze směsi feritu a bainitu. Distribuce útvarů feritu a bainitu svědčí o tom, že austenitická zrna vzniklá v průběhu solidifikace svaru nebyla v této oblasti svaru výrazně usměrněna ve směru odvodu tepla do základního materiálu.



a)

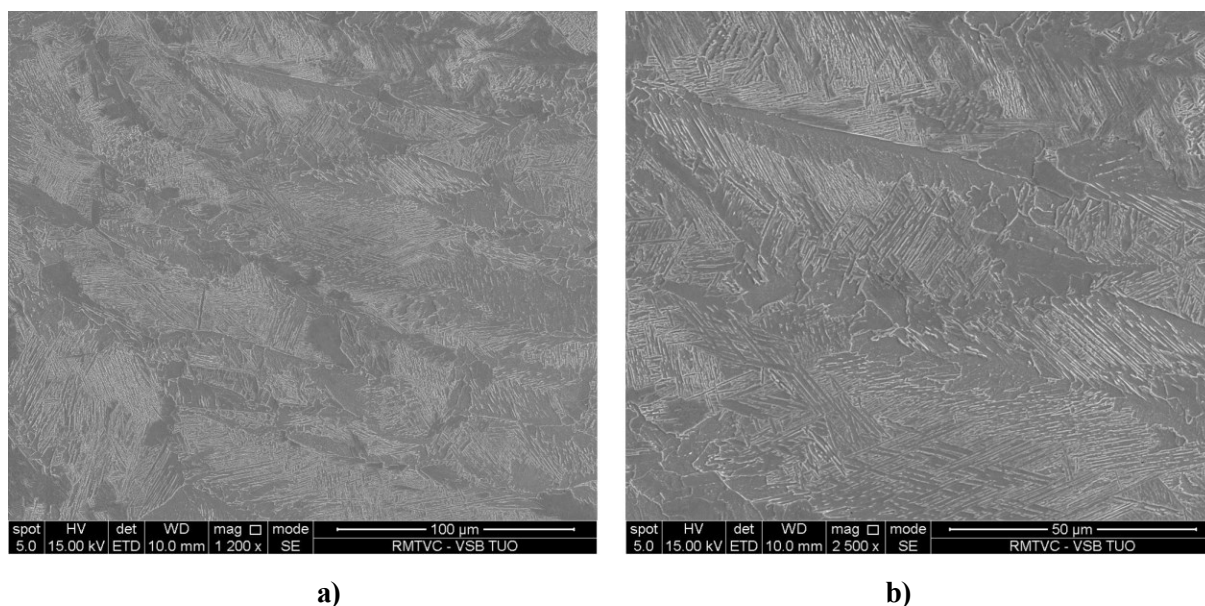
b)

**Obr. 3.12** Mikrostruktura ve středu SK

a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x



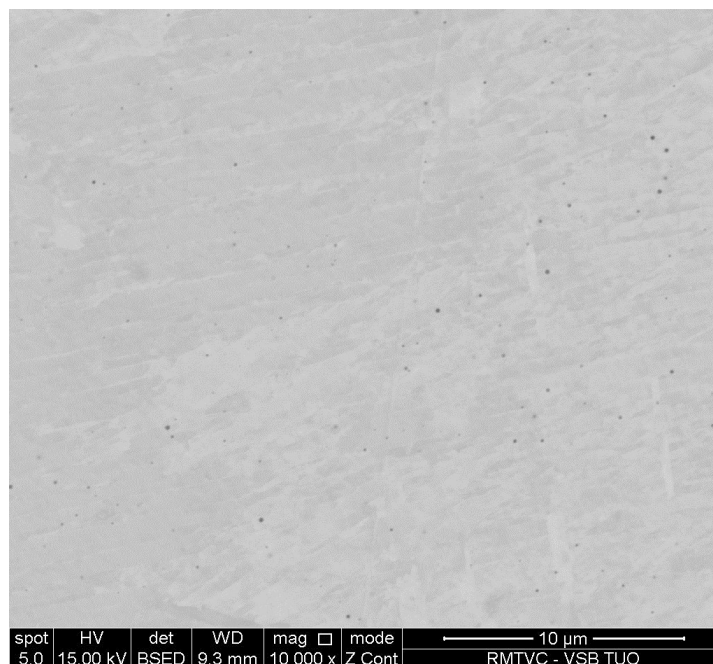
Mikrostruktura v SK v oblasti přiléhající k TOO (*Obr. 3.13*) je směsí malého podílu feritu a bainitu. Během překrystalizace austenitických zrn bylo zachováno protažení zrn ve směru odvodu tepla.



***Obr. 3.13*** Mikrostruktura SK v blízkosti TOO

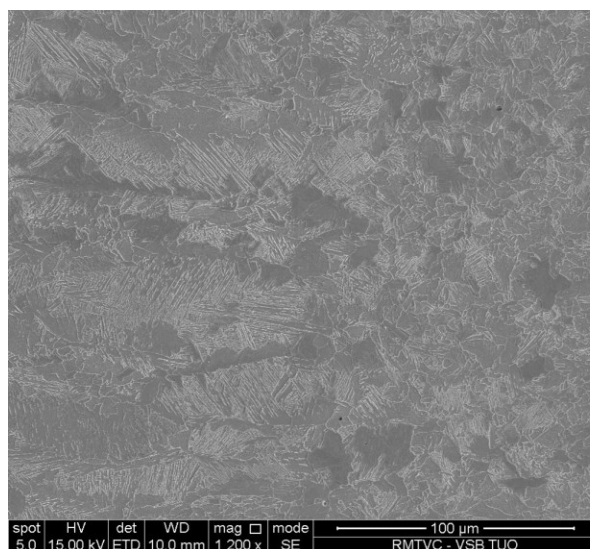
a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x

V SK se vyskytovaly četné globulární vměstky oxidického charakteru (*Obr. 3.14*), které byly pozorovatelné až při zvětšení 10 000 x. Tyto vměstky vznikly během solidifikace svaru v důsledku poklesu rozpustnosti kyslíku v kovové matici. V důsledku velmi rychlého ochlazování svaru mají vměstky velmi malou velikost. Pomocí EDX se nám podařilo zjistit, že jsou vměstky složeny převážně z hlinitanů, což má návaznost na složení ZM, které má zvýšený obsah hliníku. Přítomnost jemných vměstků svědčí o tom, že proces svařování nebyl dostatečně ochráněn inertní atmosférou v průběhu svařování.

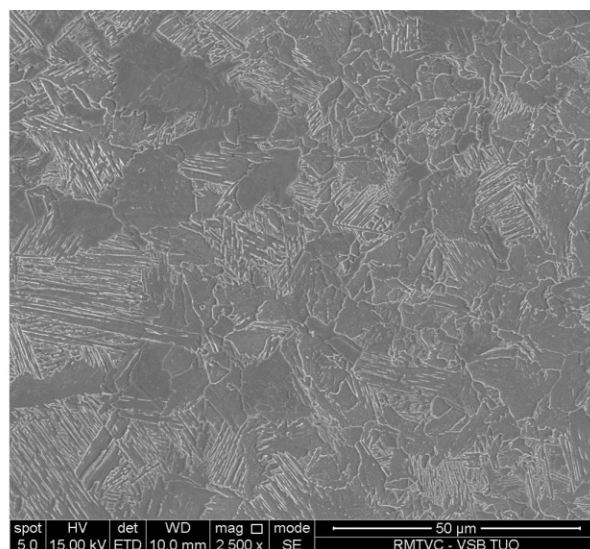


**Obr. 3.14** Jemné nekovové vměstky ve SK

Mikrostruktura v pásmu přehřátí TOO (Obr. 3.15) se skládá ze směsi feritu a bainitu. Struktura je jemnozrná, což svědčí o tom, že díky použití metody svařování 52 v této oblasti nestačilo dojít k výraznému zhrubnutí austenitického zrna. Lze však předpokládat, že zde došlo k výraznému rozpuštění částic karbidů, které byly přítomny v ZM.



a)

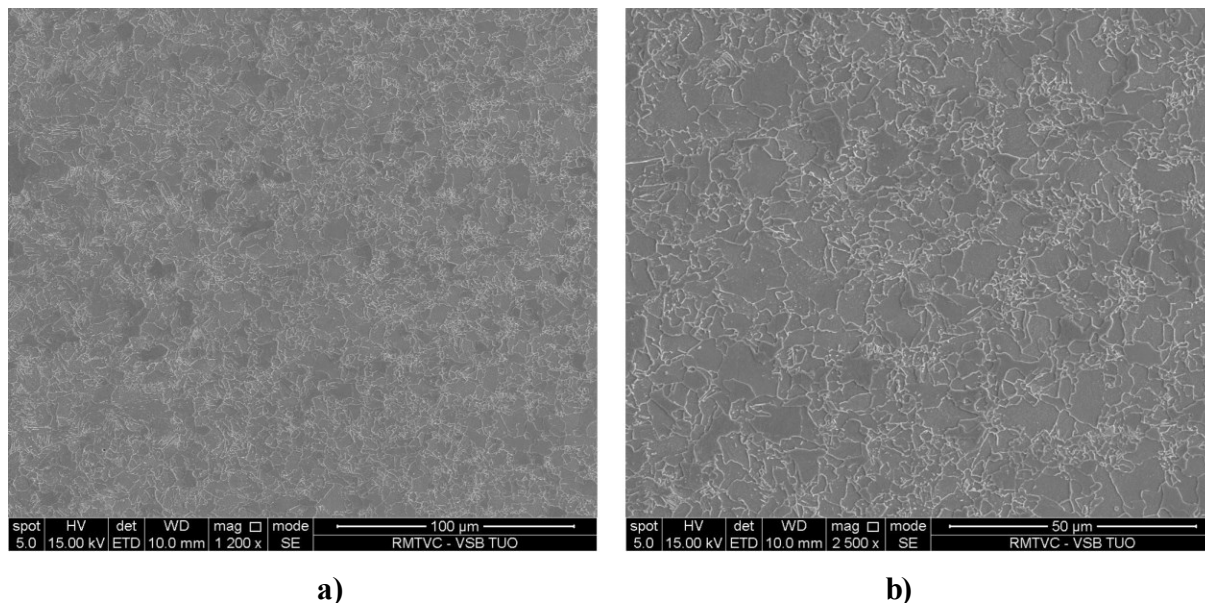


b)

**Obr. 3.15** Mikrostruktura TOO v pásmu přehřátí

a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x

V pásmu normalizace TOO (*Obr. 3.16*) se mikrostruktura skládá z velmi jemnozrnné feritické struktury. V této oblasti došlo během svařování pouze k částečnému rozpuštění částic karbidů přítomných v ZM. Tyto precipitáty nám účinně zbrzdily růst austenitického zrna. Velmi jemná zrna feritu vznikla při rozpadu jemnozrnného austenitu.

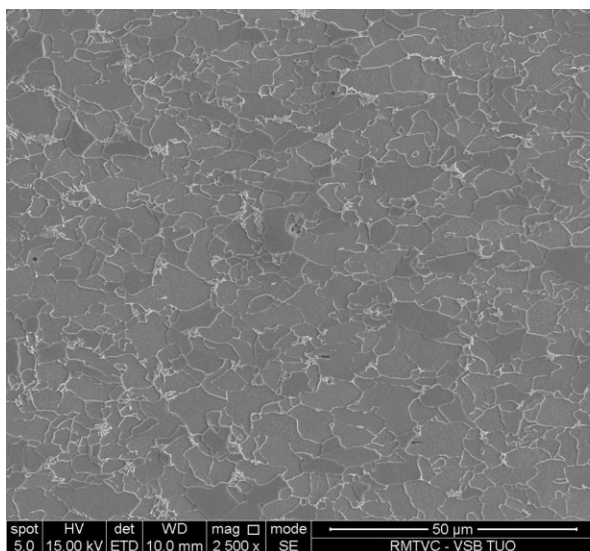


***Obr. 3.16*** Mikrostruktura TOO v pásmu normalizace

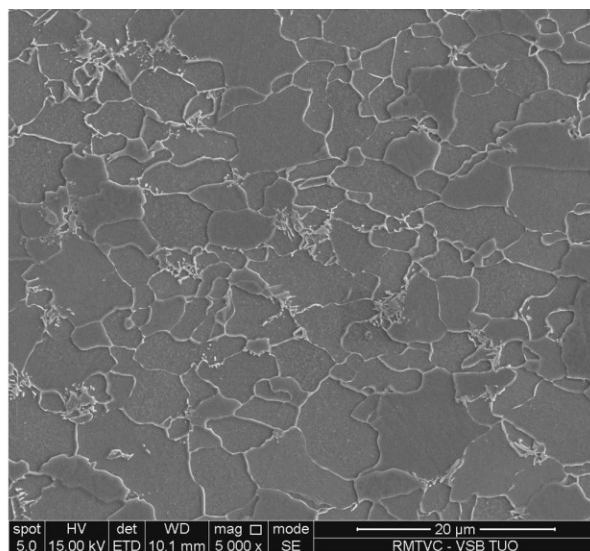
*a)* při zvětšení 1 200 x, *b)* při zvětšení 2 500 x

Mikrostruktura v pásmu částečné překrystalizace TOO (*Obr. 3.17*) je převážně složena z feritu s malými ostrůvky bainitu. Podíl perlitu s bainitem je v této oblasti malý, jelikož byl významný podíl uhlíku v ZM vázán na karbidy, bylo obohacení austenitu, vzniklého mezi teplotami  $A_{c3}$  až  $A_{c1}$ , menší než by odpovídalo rovnováze.





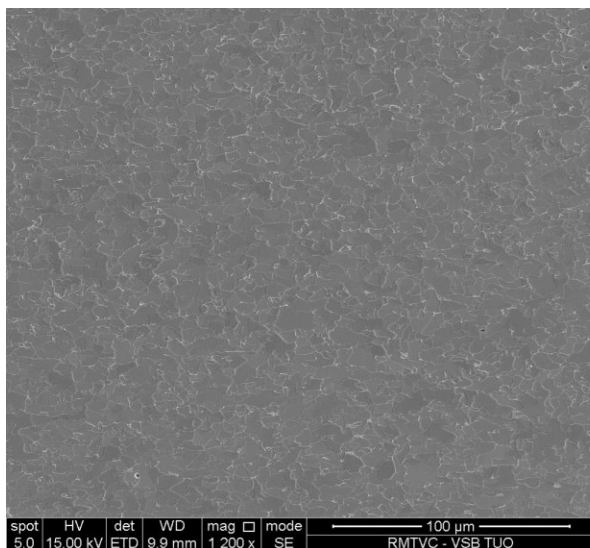
a)



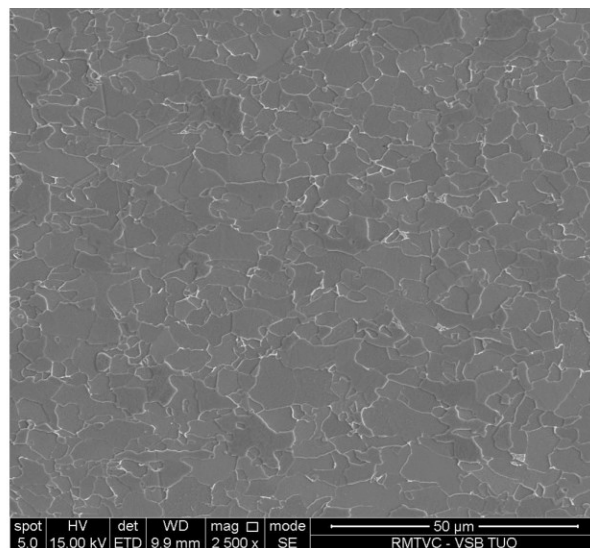
b)

**Obr. 3.17** Mikrostruktura TOO v pásmu částečné překrystalizace  
a) při zvětšení 2 500 x, b) při zvětšení 5 000 x

Mikrostruktura ZM (Obr. 3.18) se skládá z velmi jemných zrn feritu, na jejichž hranicích jsou lokálně vyloučeny zhrublé částice karbidů. V malém množství se ve feritické matici vyskytly útvary perlitické složky. V ZM byly přítomny také nekovové vměstky (Obr. 3.19). Pomocí EDX bylo zjištěno, že se jedná převážně o hlinítky a komplexní oxisulfidy.

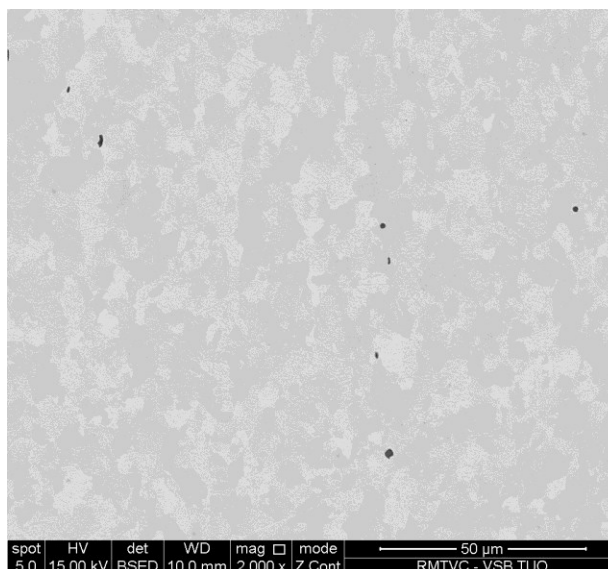


a)



b)

**Obr. 3.18** Mikrostruktura základního materiálu  
a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x

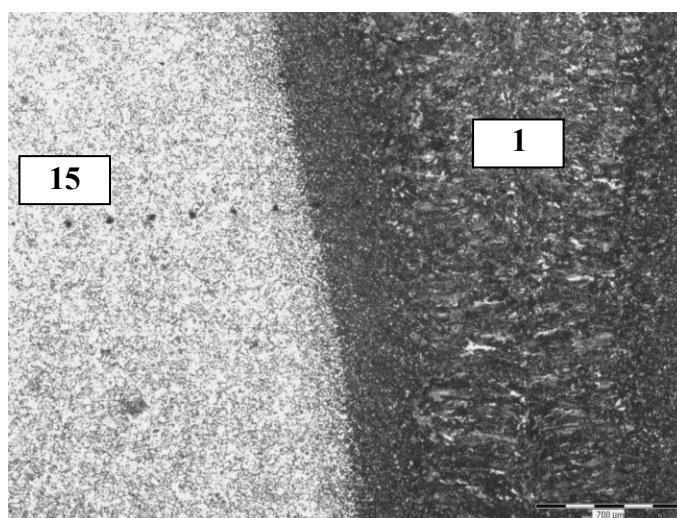


**Obr. 3.19** Nekovové vměstky v ZM

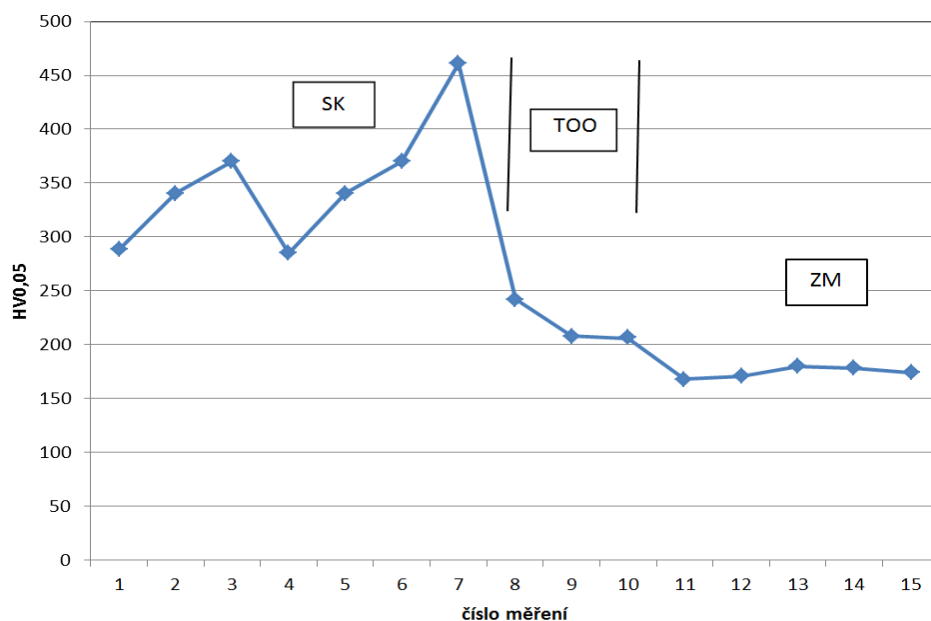
### 3.3.2 Výsledky zkoušek vzorku L3

Z profilu mikrotvrdomosti (*Obr. 3.21*) lze vypočítat, že byla tvrdost v TOO zvýšena jen mírně, za to v oblasti SK se tvrdost zvýšila z hodnoty 175 HV<sub>0,05</sub> v oblasti ZM na průměrnou hodnotu 350 HV<sub>0,05</sub>. Rozptyl naměřených hodnot v SK ve veliký a pravděpodobně jej lze připsat strukturní heterogenitě v této oblasti.

Vzhledem ke zvýšení tvrdosti svarového nad 380 HV, což je mezní hodnota definovaná pro daný materiál normou ČSN EN 1043-1, v oblasti SK a TOO, je nutné provést změnu parametrů svařování nebo daný spoj podrobit žhání na snížení vnitřního pnutí s cílem dosáhnout tvrdosti do 320 HV.



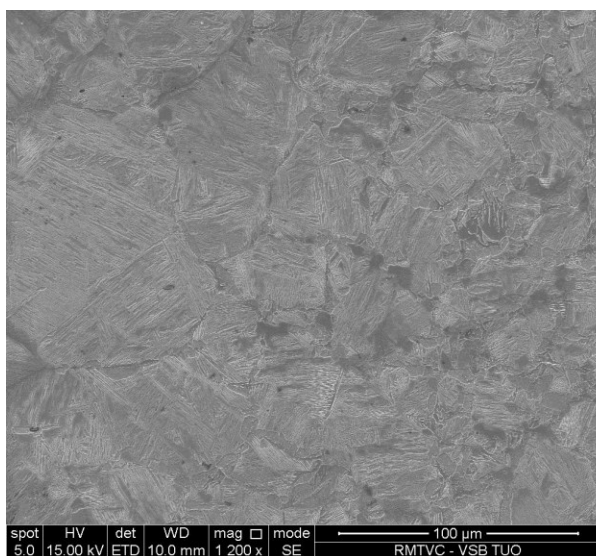
**Obr. 3. 20** Makrostruktura svarového spoje vzorku L3 s vtisky indentoru



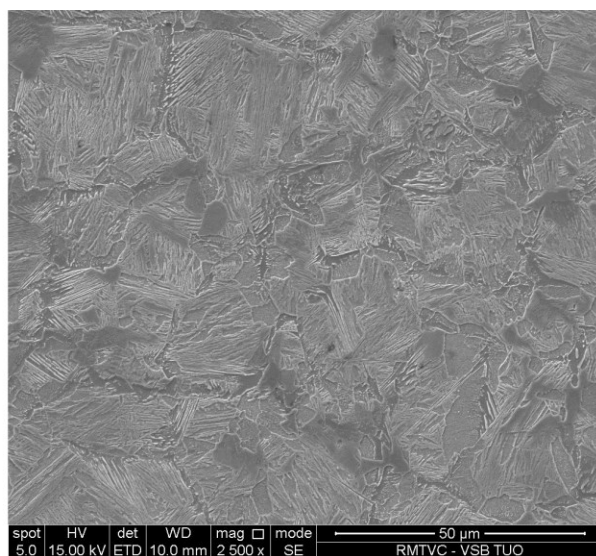
**Obr. 3.21** Profil mikrotvrdosti HV0,05 u vzorku L3

Typická mikrostruktura ve středu TOO (*Obr. 3.22*) se skládá převážně z bainitické složky s malým podílem feritu podél hranici původních perlitických zrn.

Mikrostruktura SK v oblasti přilehlé k TOO (*Obr. 3.23*) je bainitická s nesouvislým lemováním částicemi feritu po hranicích austenitických zrn. Austenitická zrna jsou protažená ve směru odvodu tepla.



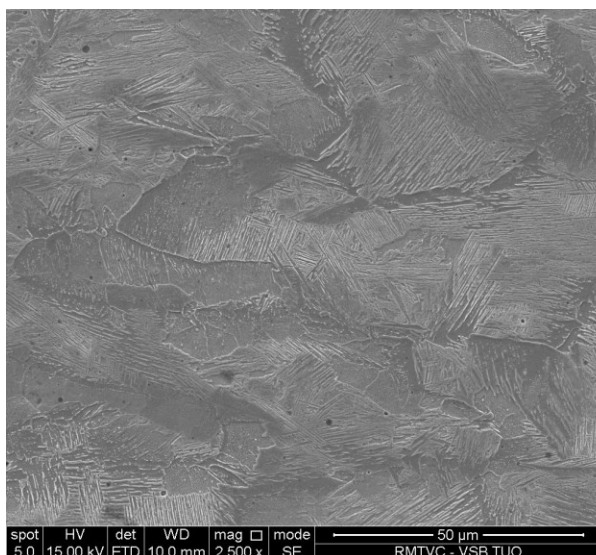
a)



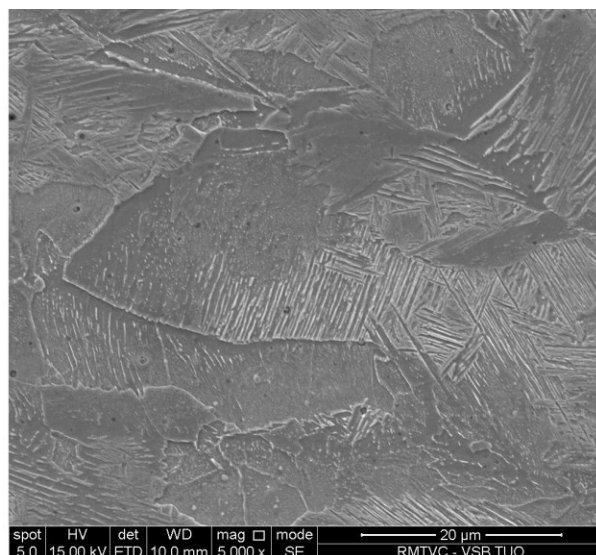
b)

**Obr. 3.22** Mikrostruktura ve středu SK

a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x



a)

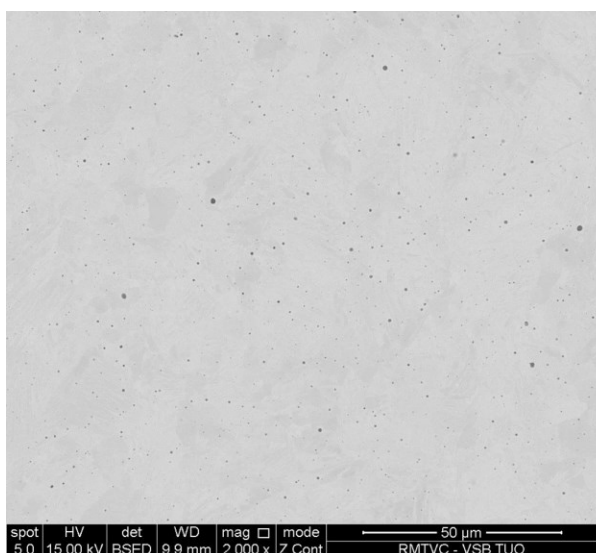


b)

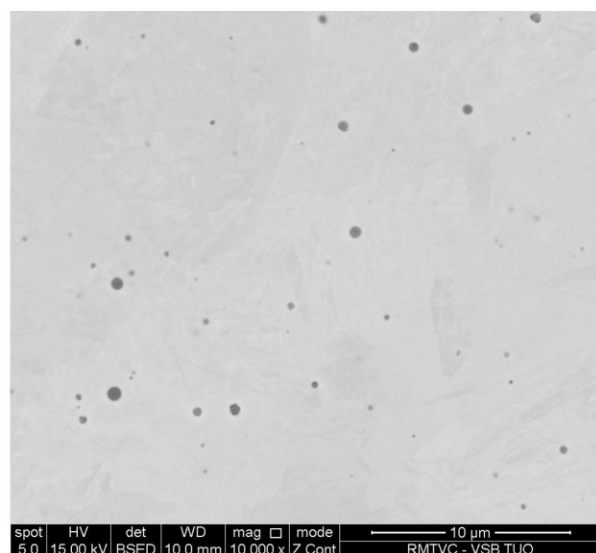
**Obr. 3.23** Mikrostruktura SK blízkosti přechodu do TOO

a) při zvětšení 2 500 x, b) při zvětšení 5 000 x

V SK se vyskytla vysoká četnost globulárních nekovových vměstků (Obr. 3.24). Jedná se o oxidy hliníku, křemíku, manganu a železa, dále se zde vyskytly oxisulfidické vměstky. Jelikož zde došlo k nárůstu množství nekovových oproti ZM, předpokládáme, že svarová lázeň nebyla dokonale ochráněna inertním plynem během výroby spoje.



a)



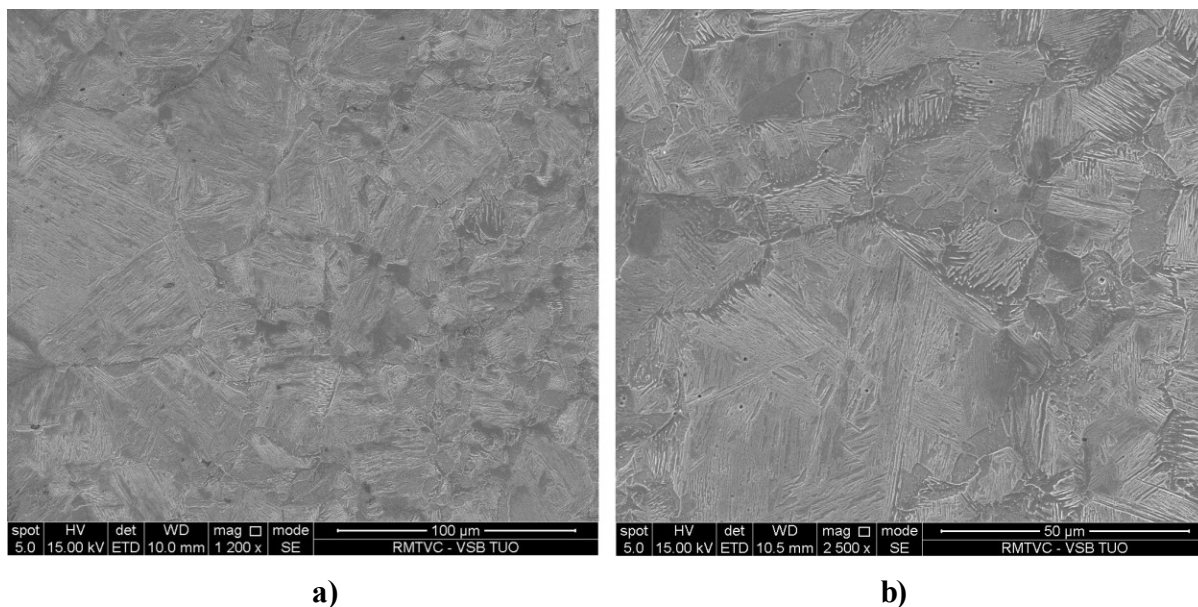
b)

**Obr. 3.24** Jemné globulární vměstky ve SK

a) při zvětšení 2 000 x, b) při zvětšení 10 000 x

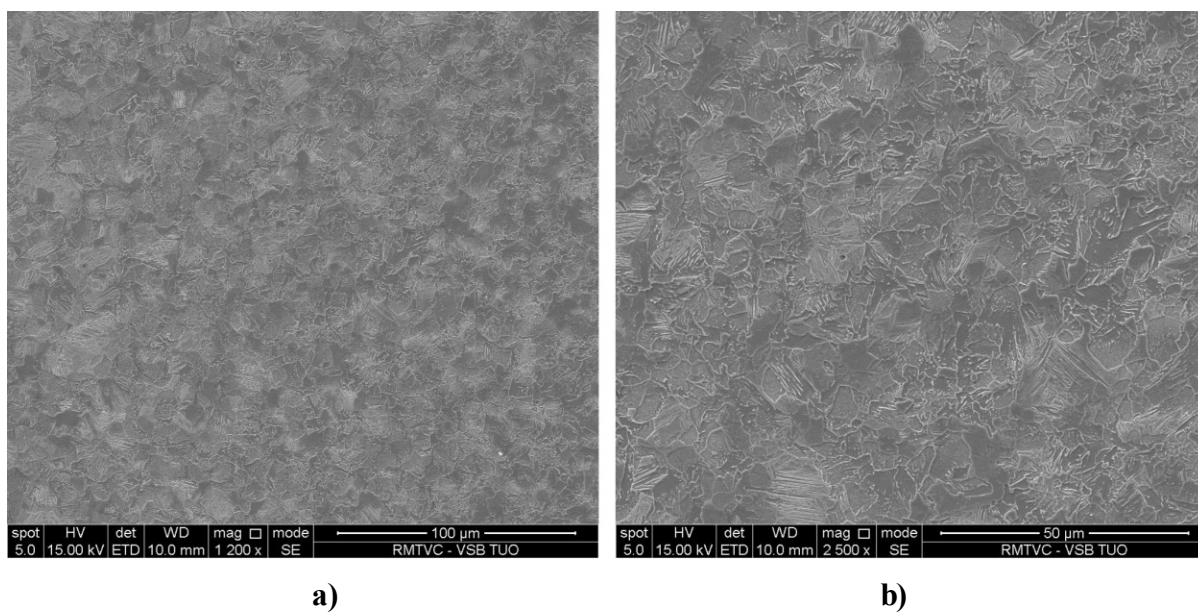
Mikrostruktura pásma přehřátí v TOO (*Obr. 3.25*) je tvořena bainitem a malým objemovým podílem feritu. Toto pásmo je díky použití metody svařování 52 velmi úzké s šířkou menší než 200  $\mu\text{m}$ .

Oblast pásma normalizace v TOO (*Obr. 3.26*) je strukturálně tvořena směsí bainitu a feritu.



***Obr. 3.25*** Mikrostruktura pásma přehřátí v TOO

*a)* při zvětšení 1 200 x, *b)* při zvětšení 2 500 x

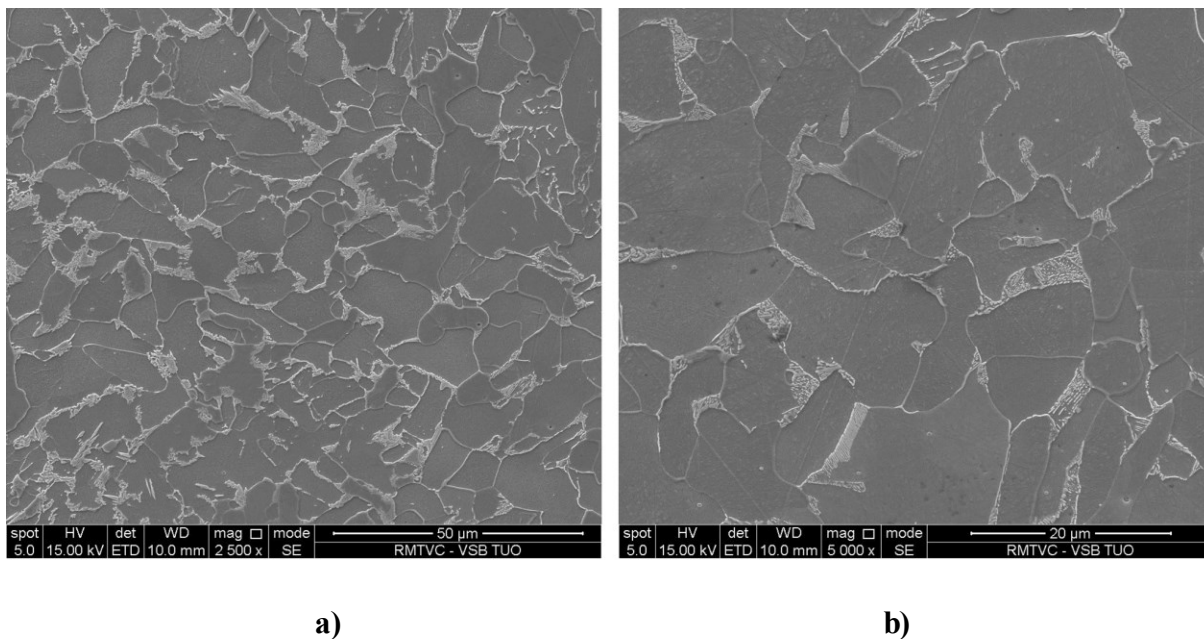


***Obr. 3.26*** Mikrostruktura pásma normalizace v TOO

*a)* při zvětšení 1 200 x, *b)* při zvětšení 2 500 x



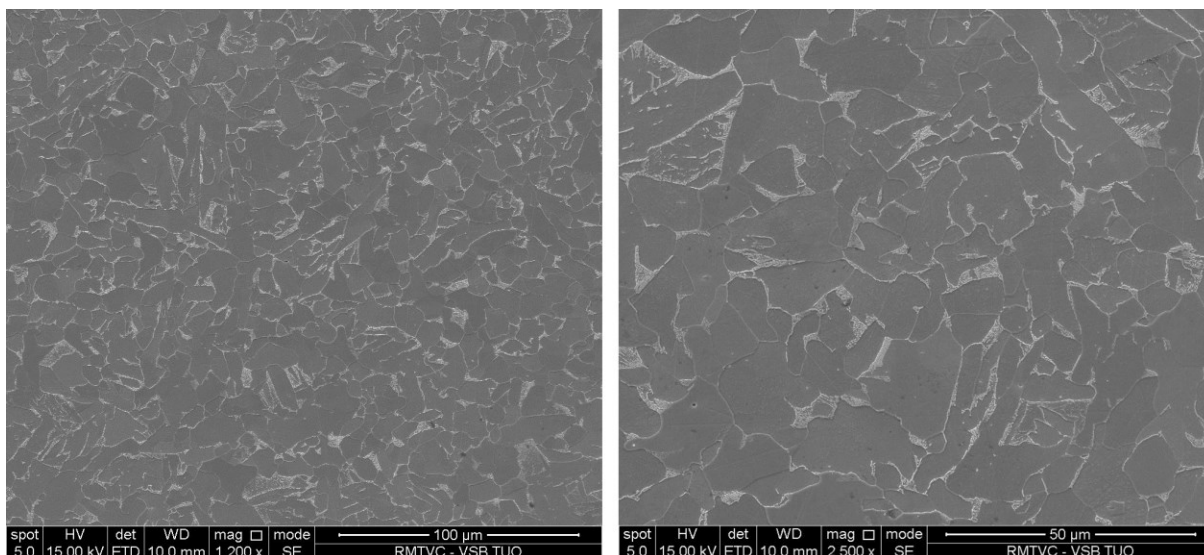
Mikrostruktura pásma částečné překrystalizace v TOO (*Obr. 3.27*) je tvořena perlitem, bainitem a útvary martenziticko – austenitické složky (tzv. M-A složka). Ty vznikly rozpadem austenitu v průběhu chladnutí svarového spoje.



***Obr. 3.27*** Mikrostruktura pásma částečné překrystalizace v TOO  
*a)* při zvětšení 2 500 x, *b)* při zvětšení 5 000 x

Mikrostruktura ZM (*Obr. 3.28*) je tvořena směsí feritu, bainitu a malým podílem perlitu. Z mapy inverzního pólového obrazce (*Obr. 3.29*) lze vidět, že je orientace feritických zrn náhodná.

V ZM se vyskytují vměstky (*Obr. 3.30*), které byly pomocí EDX identifikovány na dva základní typy. Mírně přetvářené vměstky (*pozice 1*) jsou sulfidy manganu a globulární vměstky (*pozice 2*) jsou tvořeny hlinitany. Množství nekovových vměstků je v ZM mnohem menší než ve SK.

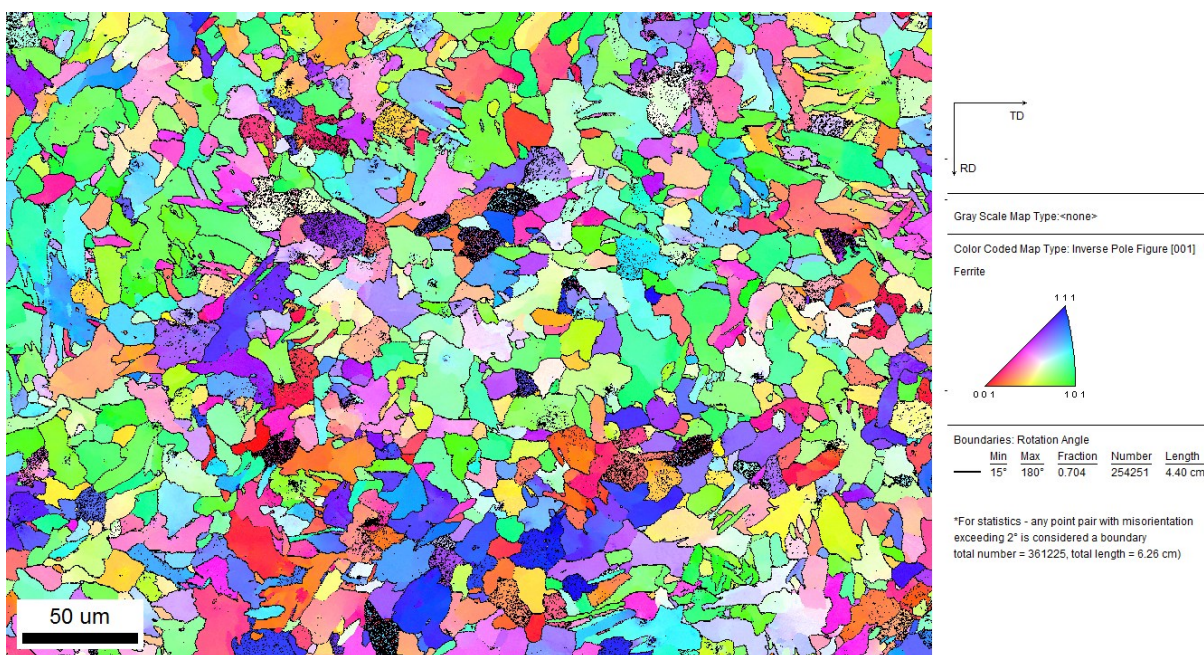


a)

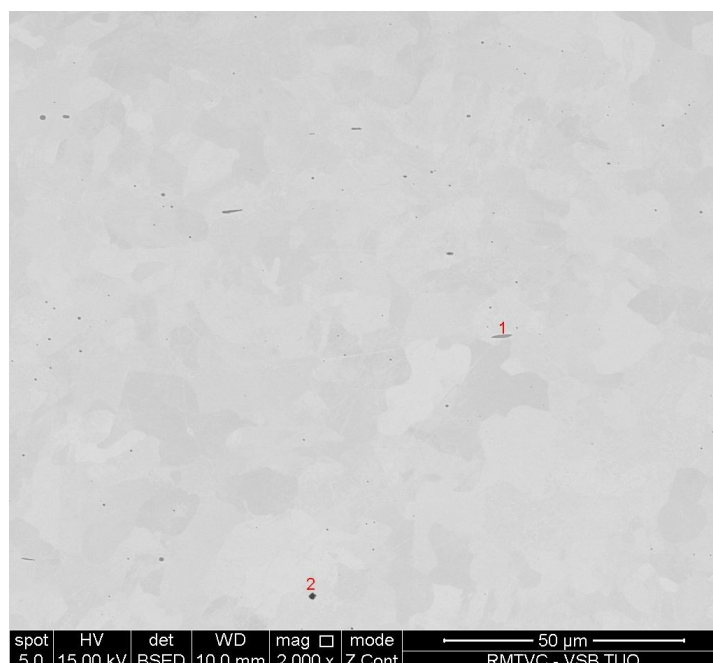
b)

**Obr. 3.28** Mikrostruktura základního materiálu

a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x



**Obr. 3.29** Mapa inverzního pólového obrazce pro směr ND s vysokoúhlovými hranicemi zrn ( $\alpha > 15^\circ$ ) v oblasti ZM

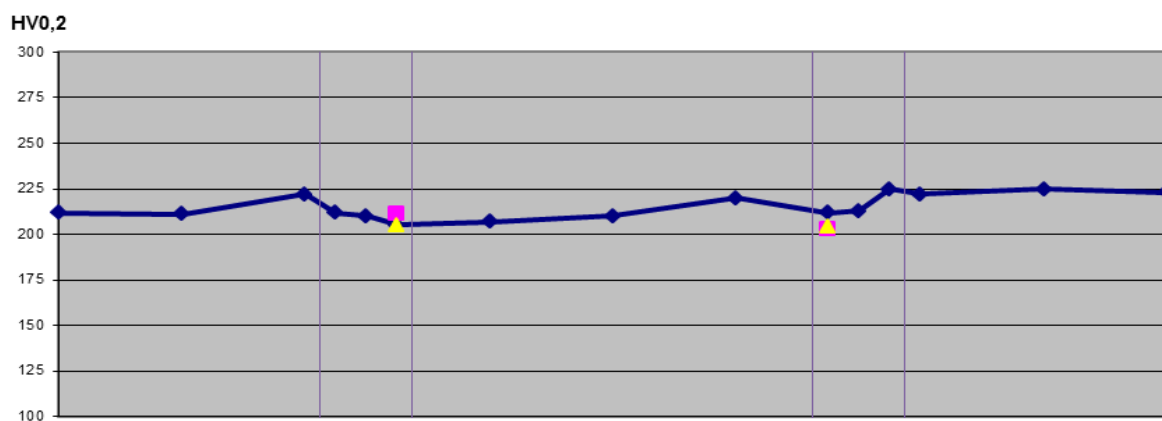


**Obr. 3.30** Nekovové vměstky v základním materiálu

1 – protvářený sulfidický vměstek, 2 – globulární vměstek hlinitanu

### 3.3.3 Výsledky zkoušek vzorku L4

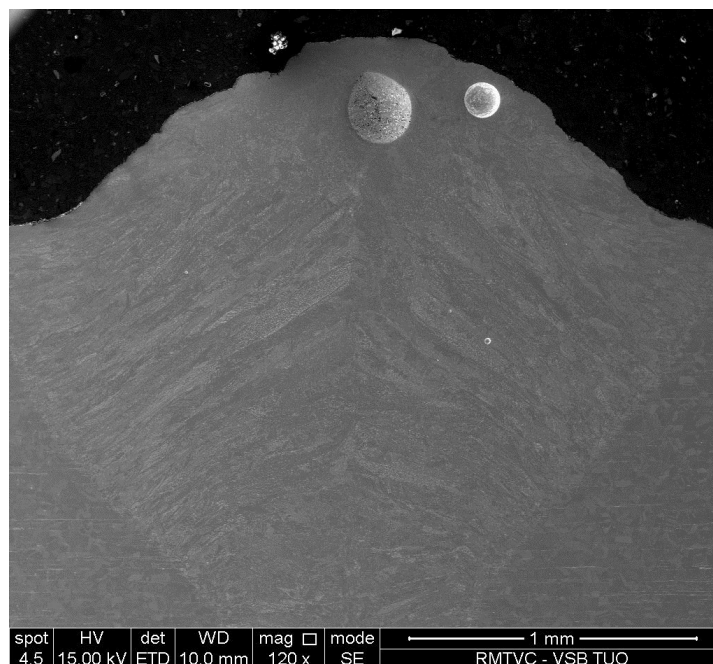
Z profilu mikrotvrlosti (Obr. 3.31) lze vypožorovat, že během svařování nedošlo ke zpevnění materiálu. Tvrdost svarového spoje je ve všech místech přibližně stejná.



**Obr. 3.31** Profil mikrotvrlosti HV0,2 u vzorku L4

Na makrovýbrusu svarového spoje (Obr. 3.32) lze vidět, že nám v horní části SK, přibližně v osově části, vznikly dvě velké plynové bubliny. Ty mohou svědčit o nevhodně provedeném postupu svařování nebo nevhodně nastavených svařovacích parametrech.

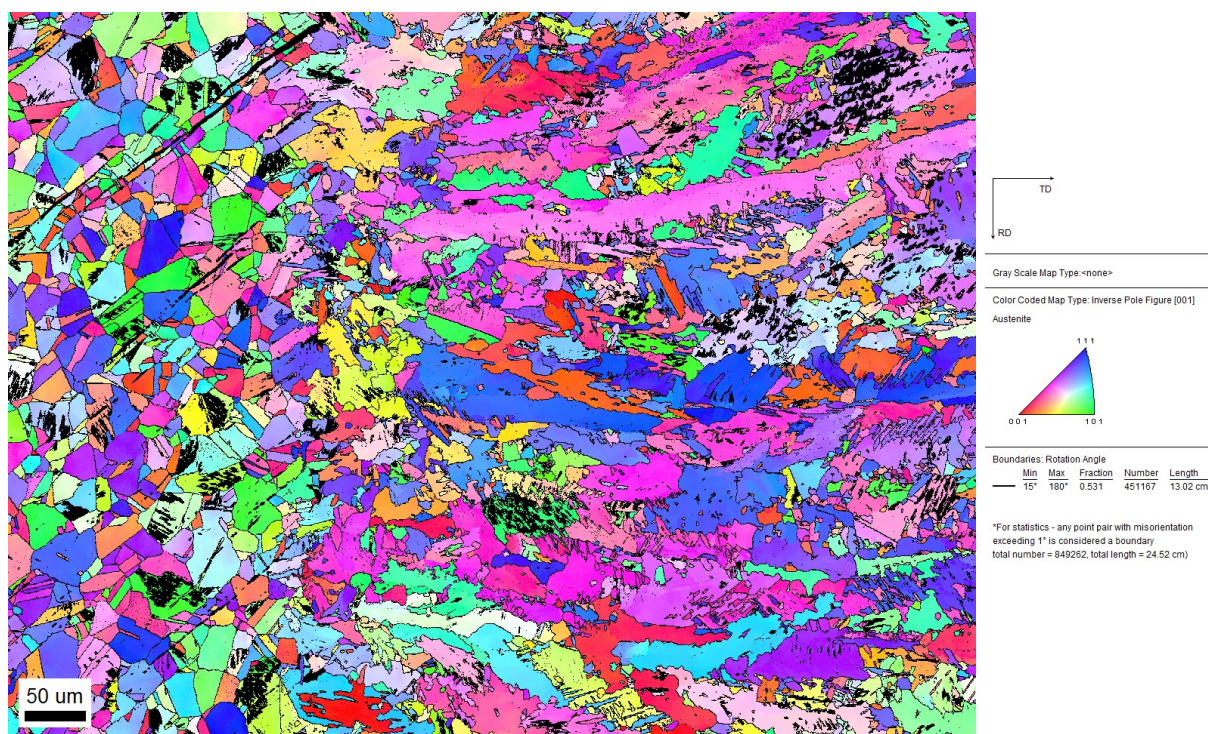




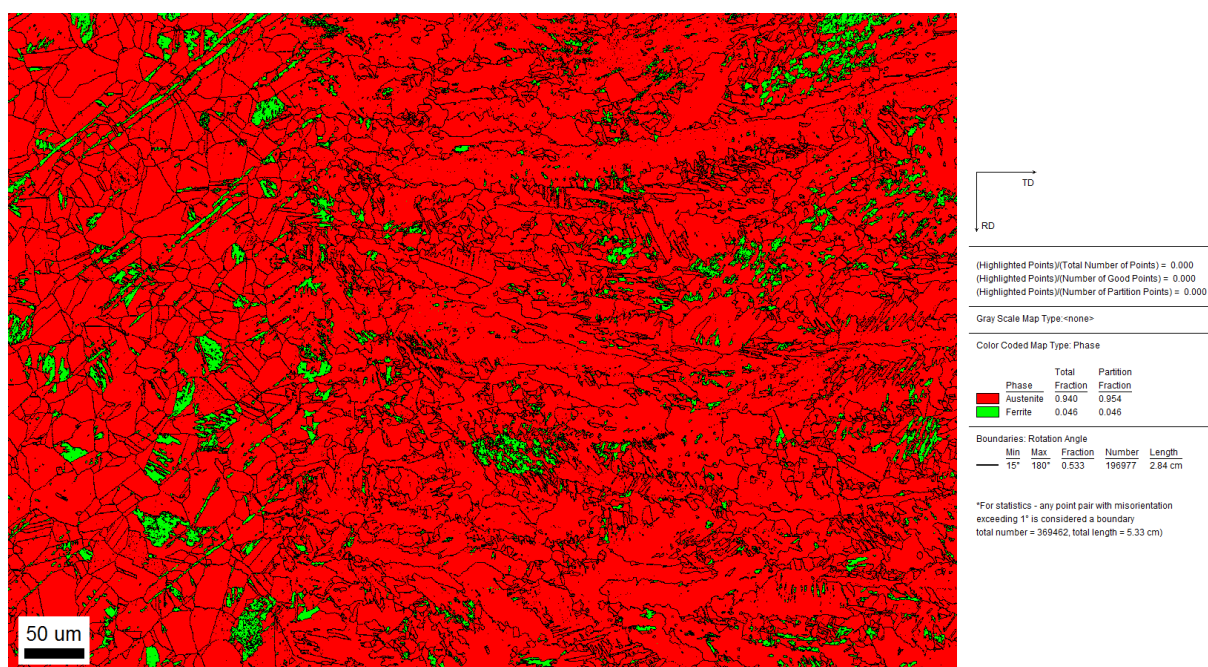
**Obr. 3.32** Makrovýbrus vzorku L4 v oblasti svatového kovu

Z mapy inverzního pólového obrazce (Obr. 3.33) jsou viditelné jednotlivé oblasti svarového spoje. Černou barvou jsou označeny pásy  $\delta$ -feritu v ZM a TOO, hrubší útvary odpovídají martenzitu uvnitř některých austenitických zrn. Licí zrna ve SK jsou protažena ve směru odvodu tepla během tuhnutí. Lze předpokládat, že díky velmi vysoké rychlosti ochlazování je podíl  $\delta$ -feritu v licí struktuře vyšší než rovnovážný. V oblasti linie částečného natavení se vyskytuje velké množství jemných zrna austenitu. Vzhledem k rychlosti svařování nedošlo v TOO k výraznému zhrubnutí austenitických zrn.

Výskyt martenzitu ve SK je možné vysvětlit tak, že malé množství mohlo být přítomno už ve výchozí struktuře vzorku. Martenzit mohl v austenitických zrnech také vzniknout během přípravy vzorků pro zkoušky, kde by se jednalo o deformačně indukovaný martenzit vzniklý při mechanickém leštění vzorku.



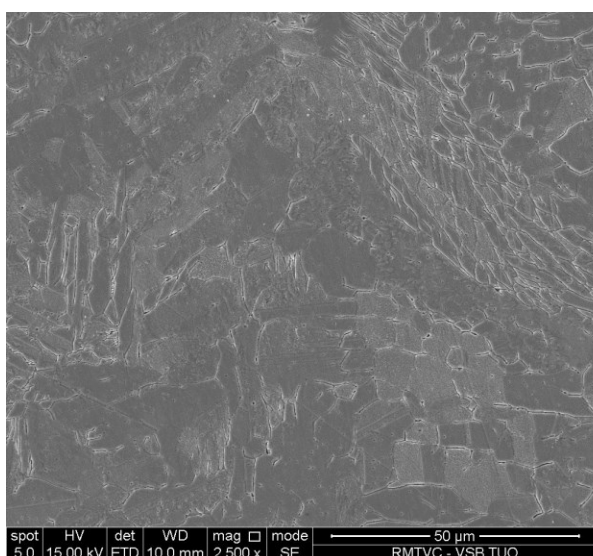
**Obr. 3.33** Mapa inverzního pólového obrazce pro směr ND s vysokoúhlovými hranicemi zrn ( $\alpha > 15^\circ$ ) v oblasti rozhraní ZM – SK



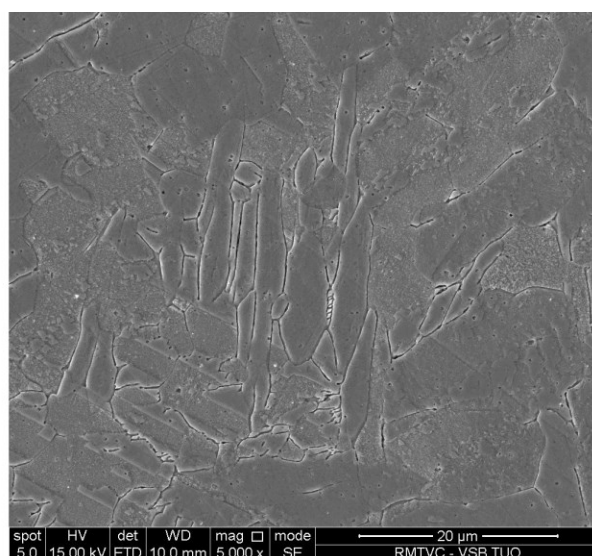
**Obr. 3.34** Fázová mapa oblasti rozhraní ZM - SK  
červená – austenit, zelená –  $\delta$ -ferit, martenzit

Typická mikrostruktura ve středu SK (*Obr. 3.35*) je tvořena rovnoosými, popř. mírně protaženými zrny austenitu, které jsou lemovány tenkými útvary  $\delta$ -feritu.

Ve SK byla zjištěna přítomnost velkého množství jemných nekovových globulárních vměstků oxidického charakteru (*Obr. 3.36*). Přítomnost velkého množství těchto vměstků svědčí o nedokonalé ochraně svarové lázně inertním plynem v průběhu svařování. Malá velikost těchto vměstků souvisí s velikou rychlostí chladnutí svarové lázně. V ZM se vměstky vyskytovaly v menší četnosti a větší velikosti. Byly tvořeny převážně hlinitany a sulfidy manganu.



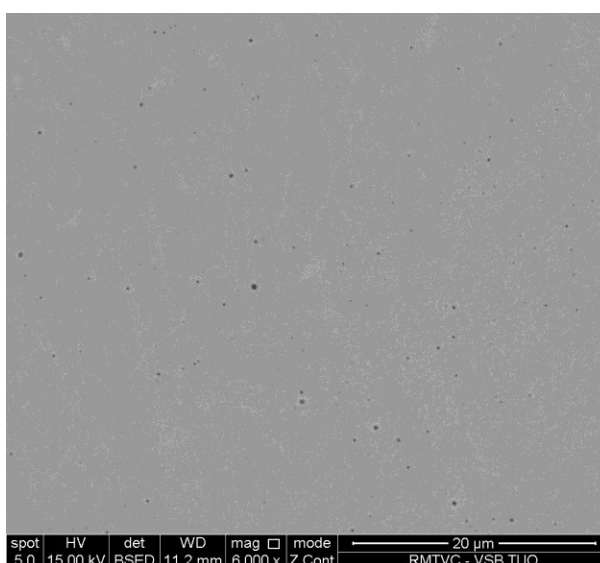
a)



b)

***Obr. 3.35*** Typická mikrostruktura ve středu SK

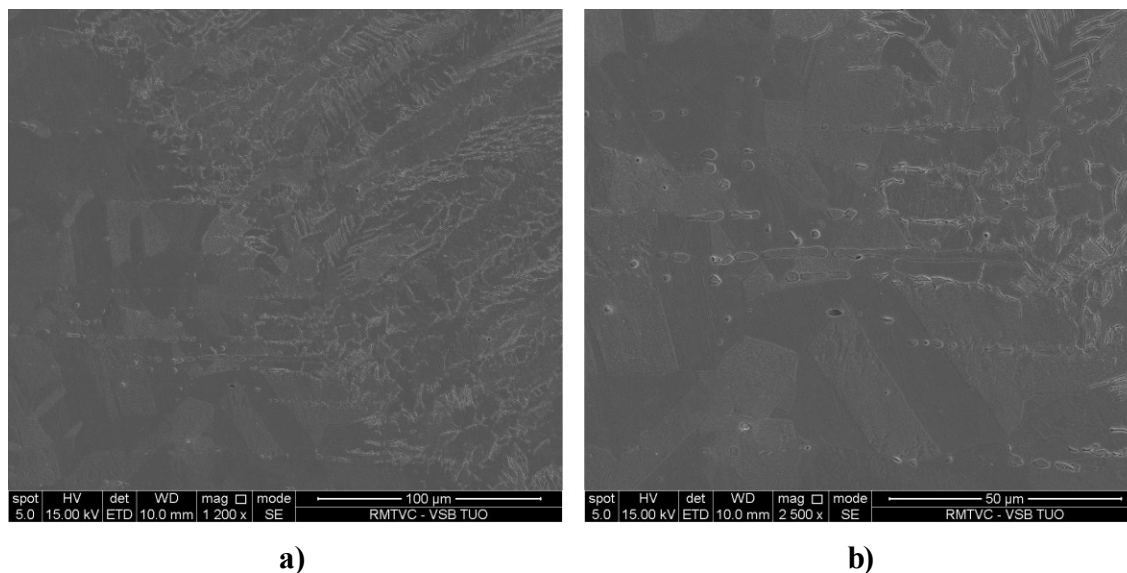
a) při zvětšení 2 500 x, b) při zvětšení 5 000 x



***Obr. 3.36*** Jemné nekovové vměstky ve SK

V oblasti pásma částečného natavení (*Obr. 3.37*) je možné pozorovat v TOO útvary  $\delta$ -feritu usměrněných ve směru tváření materiálu. Ve SK jsou pozorovatelné vyloučené útvary  $\delta$ -feritu v licií struktuře.

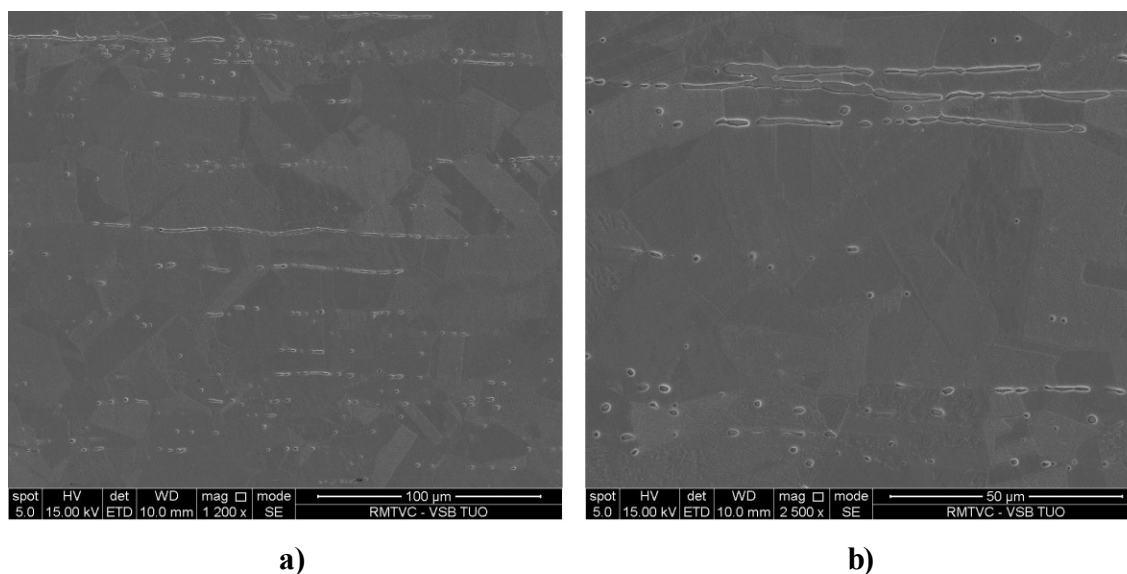
Jelikož v TOO nedošlo k polymorfní přeměně struktury, nevyskytují se zde pásma normalizace a částečné překrystalizace. V této oblasti spoje došlo k zjemnění zrna.



***Obr. 3.37*** Mikrostruktura na rozhraní SK s TOO

*a)* při zvětšení 1 200 x, *b)* při zvětšení 2 500 x

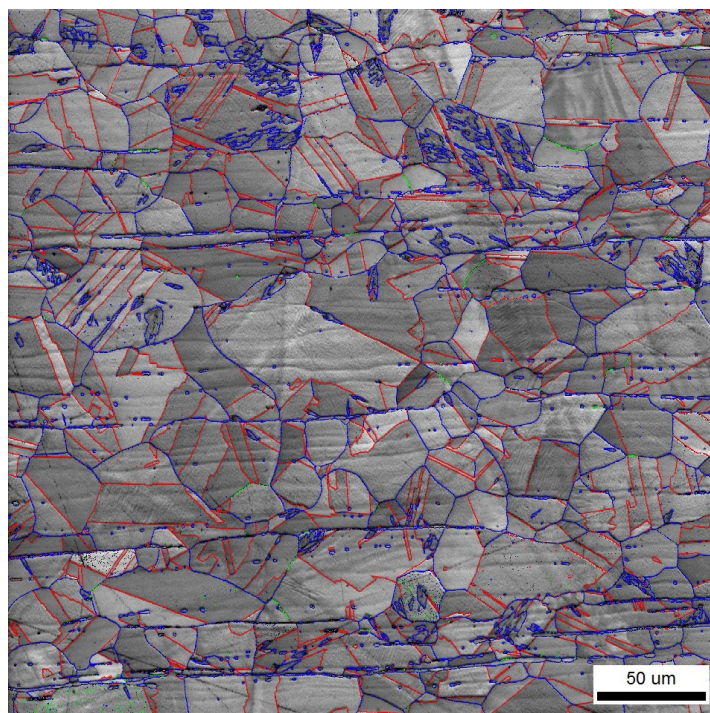
Základní materiál se strukturně skládá (*Obr. 3.38*) z austenitické matrice s rozválcovanými útvary  $\delta$ -feritu. V některých zrnech austenitu se vyskytovaly útvary martenzitu.



***Obr. 3.38*** Mikrostruktura základního materiálu

*a)* při zvětšení 1 200 x, *b)* při zvětšení 2 500 x



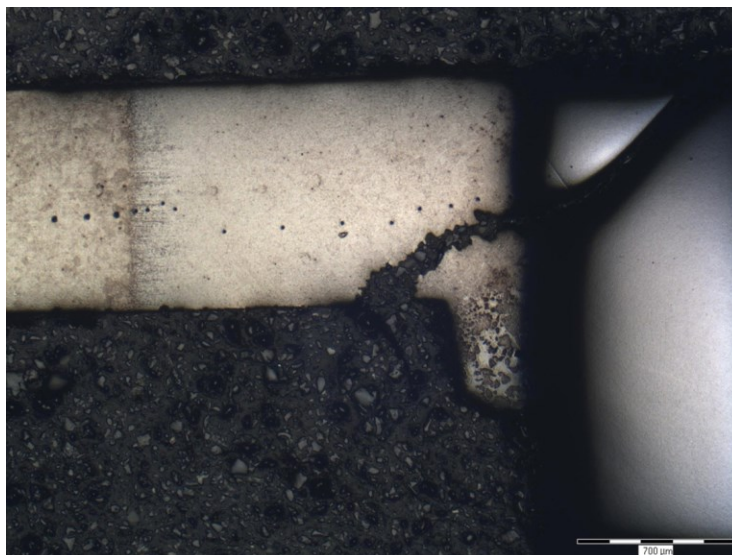


**Obr. 3.39** Rozlišení hranic zrn v ZM podle vzájemné dezorientace sousedících zrn  
*modrá* – vysokoúhlové hranice ( $\alpha > 15^\circ$ ), *červená* – dvojčatová orientace,  
*zelená* – hranice zrn menší než  $15^\circ$

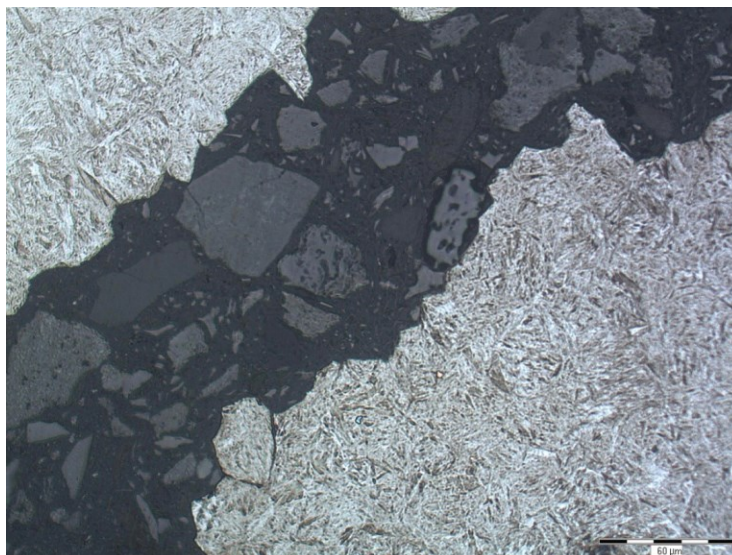
### 3.3.4 Výsledky zkoušek vzorku L5

Tento vzorek byl při zalisování do vodivého bakelitu, za teploty cca  $180^\circ\text{C}$  a zvýšeného tlaku, porušen ve formě křehkého interkrystalického lomu (*Obr. 3.41*) v oblasti linie ztavení, který dále pokračoval přes slinutý karbid. Na snímku (*Obr. 3.40*) je dále viditelná přechodová oblast o šířce přibližně  $1\,700\,\mu\text{m}$ . Jelikož je šířka této oblasti mnohokrát větší v porovnání s šířkou TOO ostatních vzorků, lze předpokládat, že bylo při svařování tohoto vzorku do něj vneseno výrazně větší množství vneseného tepla. V oblasti natavení laserovým paprskem došlo ke vzniku útvaru kapkovitého tvaru, který vznikl částečným „vytečením“ promíšeného materiálu.

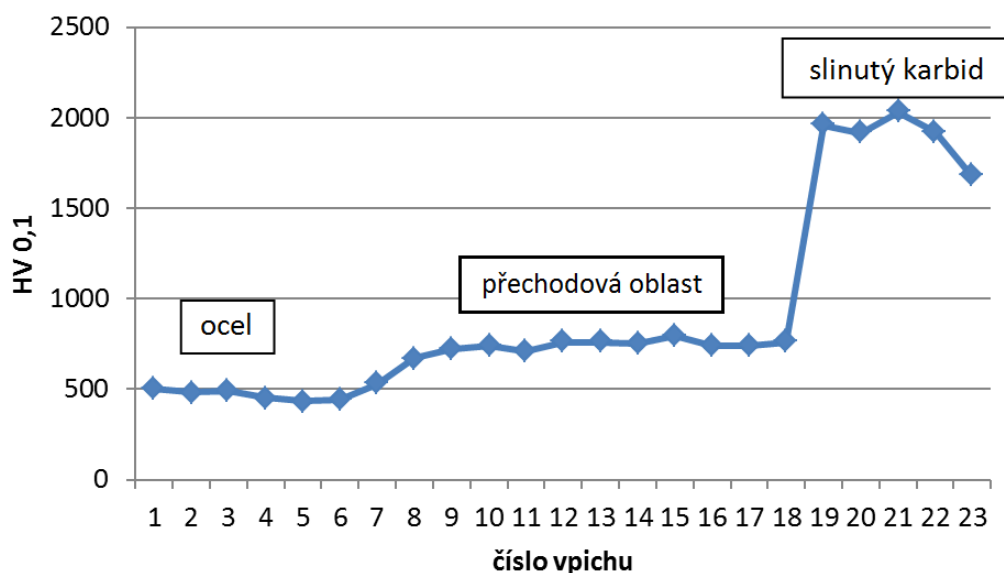
Z profilu mikrotvrdosti (*Obr. 3.42*) je jasně viditelný nárůst tvrdosti ve směru ze ZM oceli přes přechodovou oblast do oblasti slinutého karbidu. Tvrdost zušlechtné oceli odpovídá hodnotám cca  $500\text{ HV}_{0,1}$ , v přechodové oblasti dosahuje  $750\text{ HV}_{0,1}$  a v oblasti slinutého karbidu činí hodnotu přibližně  $2\,000\text{ HV}_{0,1}$ .



**Obr. 3.40** Makrovýbrus vzorku L5 s viditelnými vpichy indentoru

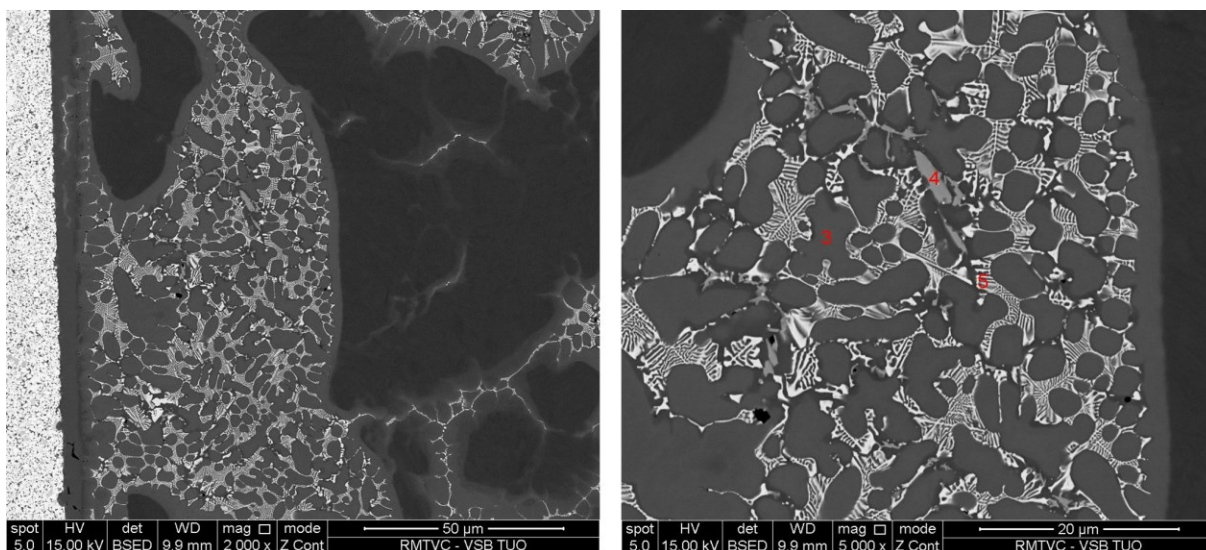


**Obr. 3.41** Lomové porušení interkrystalického charakteru v přechodové oblasti



**Obr. 3.42** Profil mikrotvrdosti HV0,1 vzorku L5

Mikrostruktura v oblasti „výtoku“ promíšeného materiálu (*Obr. 3.43*) oceli se slinutým karbidem se skládá z kovové matrice s eutektickými útvary. Pomocí EDX jsme určili složení těchto útvarů. Útvar označený číslem 3 je tvořen kovovou matricí s tuhým roztokem wolframu v železe. Útvar označený 4 je podobné struktury, ale s vyšším podílem železa oproti matrici. U útvaru značeného 5 se jedná o wolframem bohatou karbidickou fází.



a)

b)

**Obr. 3.43** Mikrostruktura přechodové oblasti v místě vytečení promíšeného materiálu

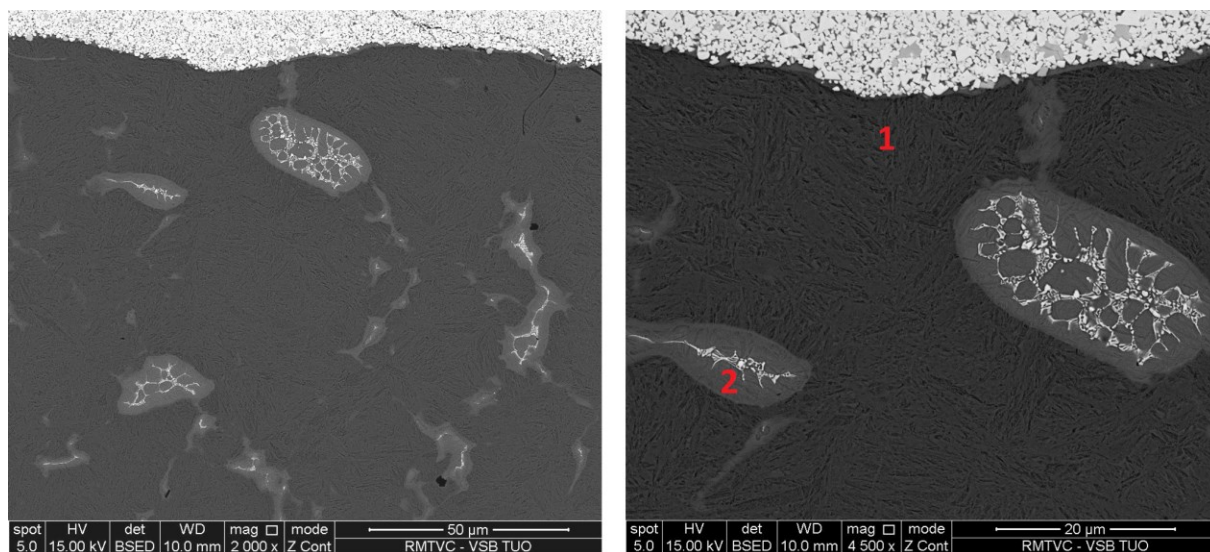
a) při zvětšení 2 000 x, b) při zvětšení 5 000 x, (3 ÷ 5 – viz text)



Mikrostruktura v přechodové oblasti ve středu tloušťky oceli je zdokumentována na *Obr. 3.44*. Rozhraní slinutý karbid – ocel je lemováno tenkou vrstvou tuhého roztoku W v Fe (šedý kontrast podél rozhraní). Ve vzdálenosti přibližně 150  $\mu\text{m}$  od rozhraní jsou v oceli přítomny útvary, které vznikly promísením obou svařovaných materiálů. Často se ve středu těchto útvarů nachází eutektika. Pomocí EDX byli v této oblasti zjištěno, že se v matici (*oblast 1*) nevyskytuje wolfram a v *oblasti 2* bylo zjištěno významné množství W rozpuštěného v Fe. Útvary vyloučené v eutektickém uspořádání byly identifikovány jako wolframem bohaté karbidy.

V oblasti přechodové oblasti v pásmu přilehlém k ZM oceli (*Obr. 3.45a*) je mikrostruktura martenzitická. Mikrostruktura přechodové oblasti v pásmu přehřátí (*Obr. 3.45b*) se skládá ze silně popouštěného martenzitu a martenzitu vzniklého při rozpadu austenitu v průběhu svařování. V důsledku tohoto jevu bylo při měření mikrotvrdosti v této oblasti indikováno značné změkčení struktury.

Mikrostruktura základního materiálu je tvořený popouštěným martenzitem, čímž se potvrzuje, že se jedná o zušlechťenou ocel.



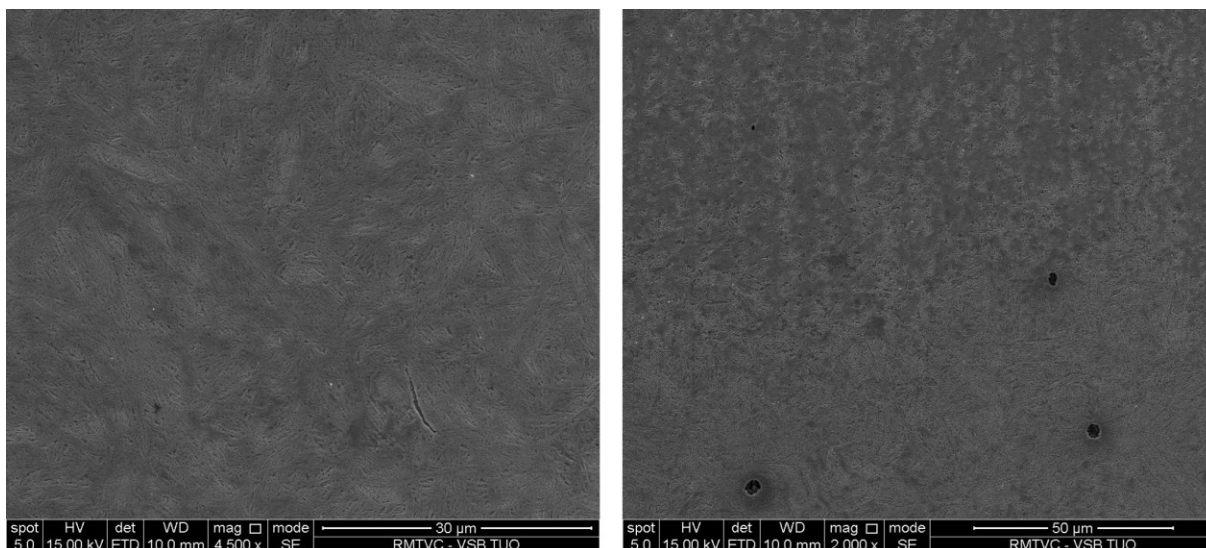
a)

b)

**Obr. 3.44** Mikrostruktura přechodové oblasti ve středu tloušťky oceli

a) při zvětšení 2 000 x, b) při zvětšení 4 500 x, (*1 ÷ 2* – viz text)





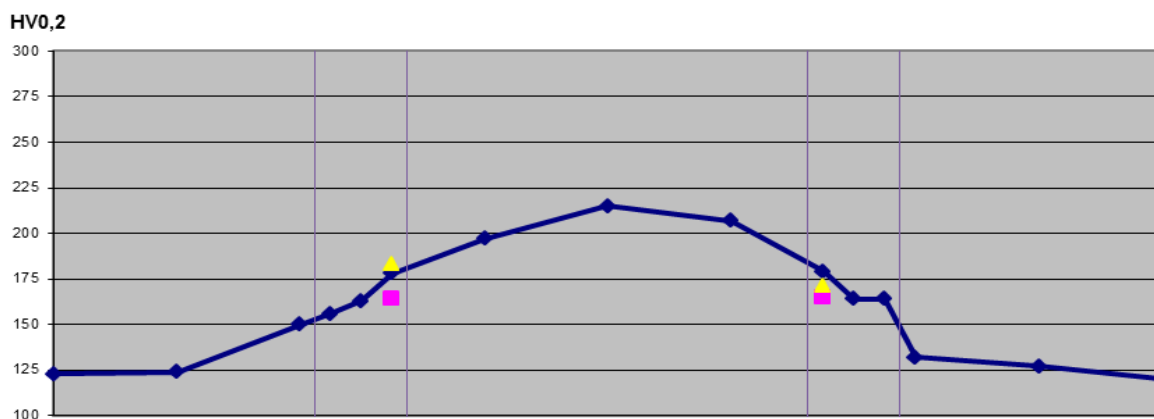
a)

b)

**Obr. 3.45** Mikrostruktura přechodové oblasti v pásmu přilehlé k ZM  
*a)* martenzitická struktura přechodové oblasti, *b)* oblast přechodu pásma  
 normalizace s pásmem částečné překrystalizace

### 3.3.5 Výsledky zkoušek vzorku L6

Z profilu mikrotvrdosti HV<sub>0,2</sub> (*Obr. 3.46*) je vidět, že se tvrdost materiálu pozvolně zvýšila z tvrdosti přibližně 125 HV<sub>0,2</sub> až na hodnotu okolo 200 HV<sub>0,2</sub> v oblasti SK.

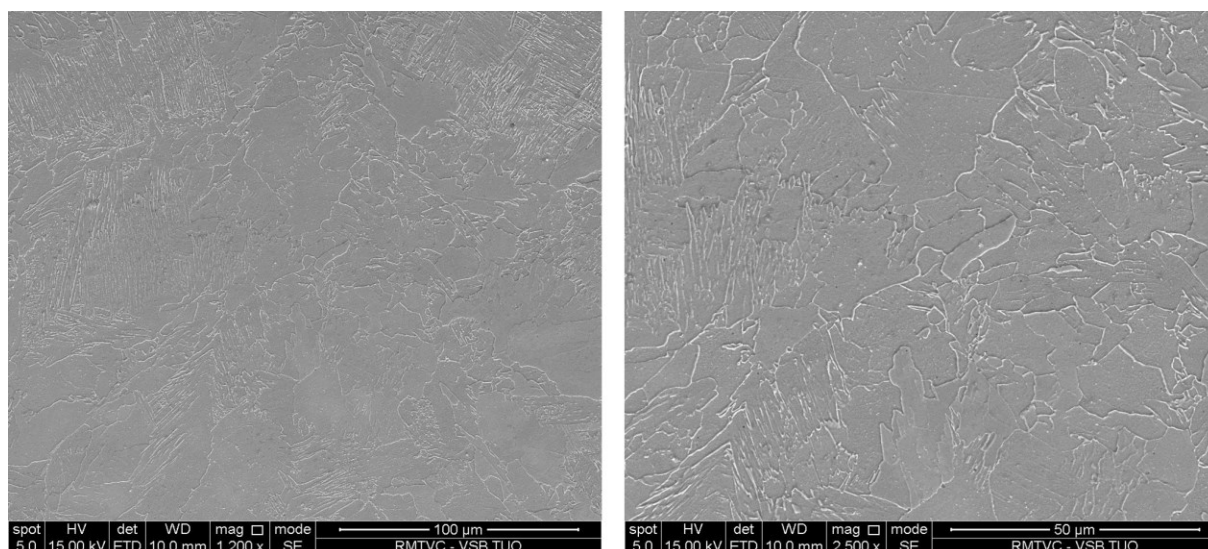


**Obr. 3.46** Profil mikrotvrdosti HV<sub>0,2</sub> u vzorku L6

Mikrostruktura ve středu svarového kovu (*Obr. 3.47*) se skládá z feritu a nízkouhlíkového bainitu.

Mikrostruktura oblasti svarového kovu v blízkosti TOO (*Obr. 3.48*) je feriticko bainitická. Jednotlivá zrna struktury jsou protažená ve směru odvodu tepla. Oblast mezery mezi svařovanými přeplátovanými plechy je částečně vyplněná oxidy železa. Tato oblast nevykazuje žádné odchylky od zbytku oblasti SK.

Ve SK byla zjištěná přítomnost velkého množství jemných globulárních vměstků (*Obr. 3.49*). Metodou EDX byly vměstky identifikovány na hlinitany a oxidy Al a Si. Přítomnost těchto vměstků svědčí o nedokonalé ochraně svarové lázně inertním plynem v průběhu svařování.

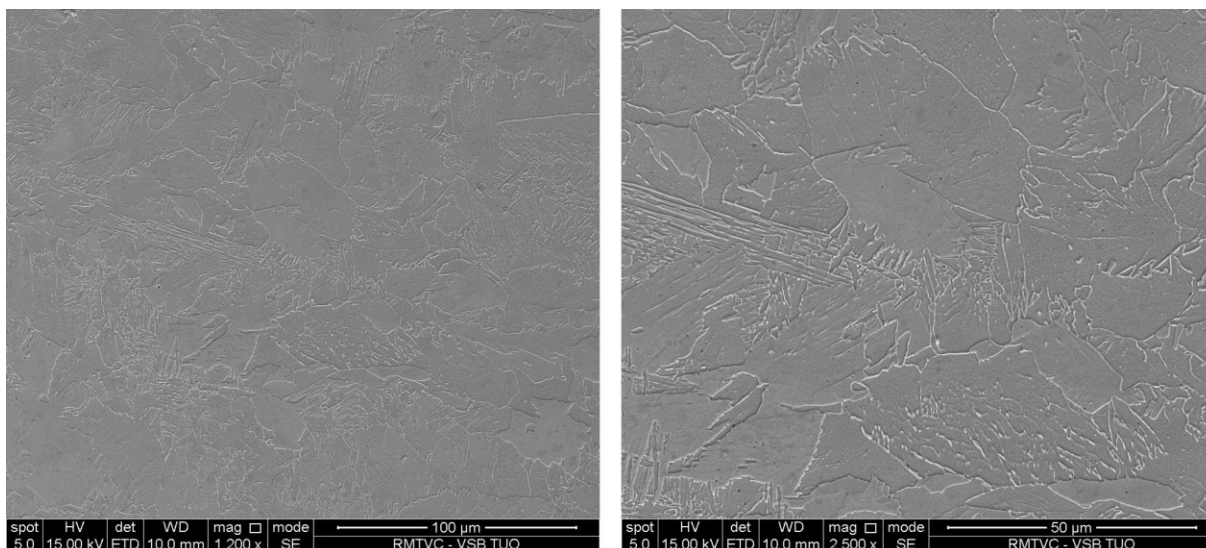


a)

b)

***Obr. 3.47*** Mikrostruktura ve středu SK

a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x

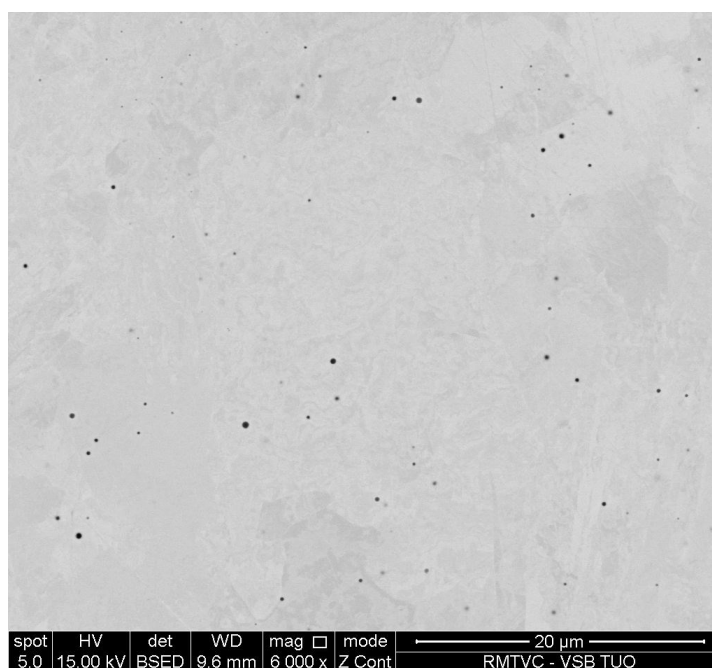


a)

b)

**Obr. 3.48** Mikrostruktura SK v blízkosti TOO

a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x

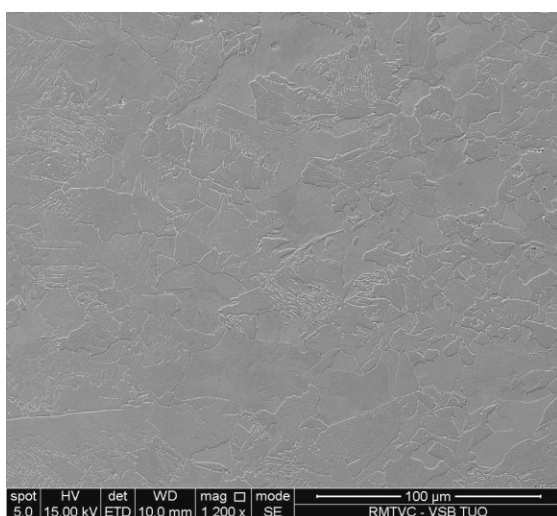


**Obr. 3.49** Jemné nekovové globulární vměstky ve SK

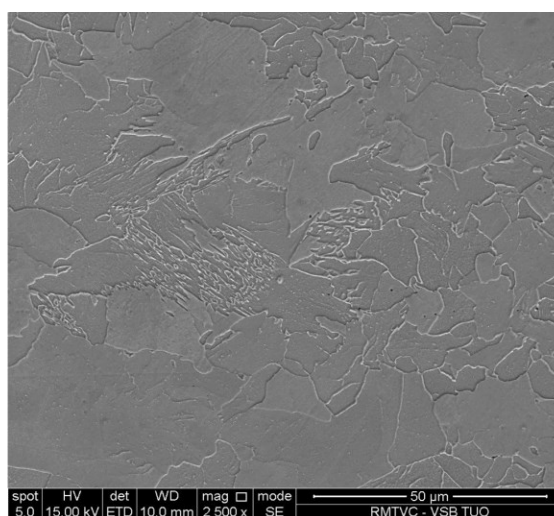
Pásmo přehřátí v TOO (*Obr. 3.50*) je tvořeno feritem a malým objemovým množstvím nízkouhlíkového bainitu. Rozměrově jsou zde feritická zrna v porovnání s oblastí SK menší, což nasvědčuje tomu, že v průběhu svařování nedošlo k výraznému zhrubnutí austenitického zrna.

Mikrostruktura pásma normalizace v TOO (*Obr. 3.51*) je feritická s nerovnoměrnou velikostí zrna. V některých feritických zrnech se vyskytují karbidické částice. Během svařování zde došlo k rozpuštění řádků karbidických částic, které byly přítomny v ZM.

Mikrostruktura pásma částečné překrystalizace v TOO (*Obr. 3.52*) je poznamenána částečnou austenitizací, která probíhala přednostně v oblastech výskytu karbidů v ZM. V důsledku velmi krátkého teplotního cyklu svařování jsou vzniklé útvary austenitu velmi malé.



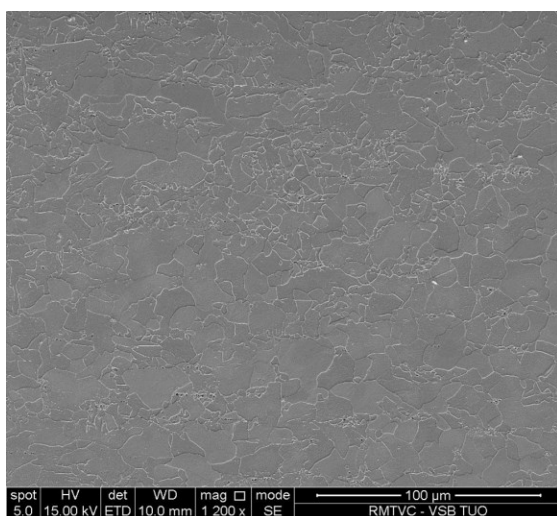
a)



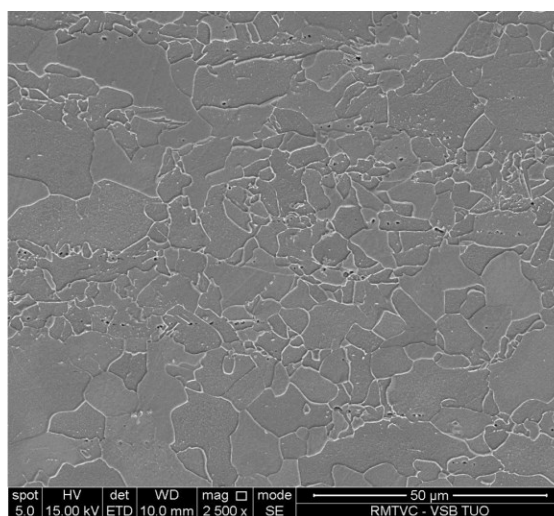
b)

**Obr. 3.50** Mikrostruktura TOO v pásmu přehřátí

a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x



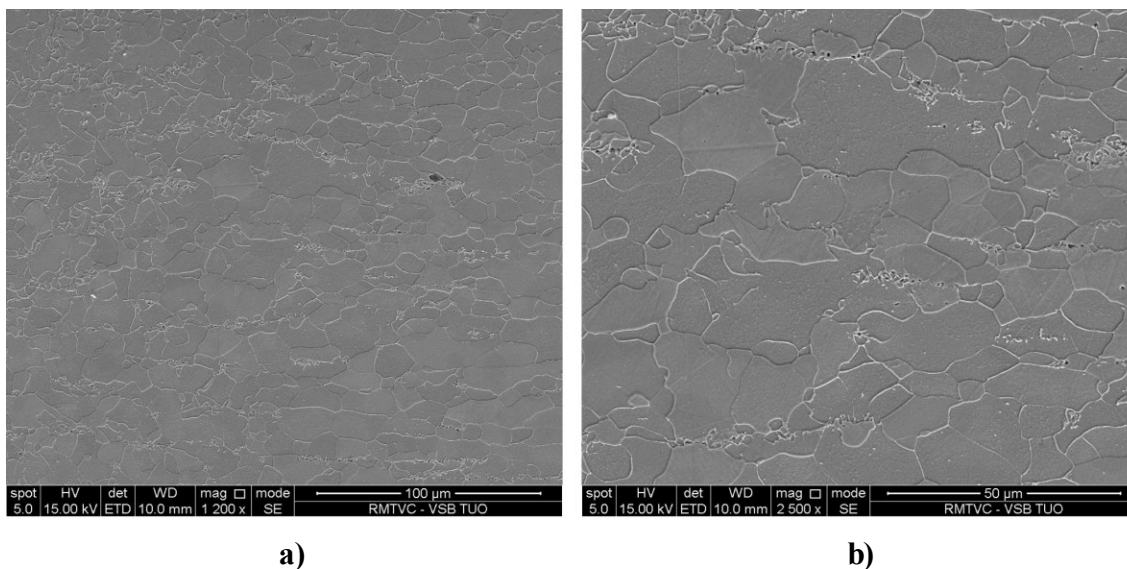
a)



b)

**Obr. 3.51** Mikrostruktura TOO v pásmu normalizace

a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x



a)

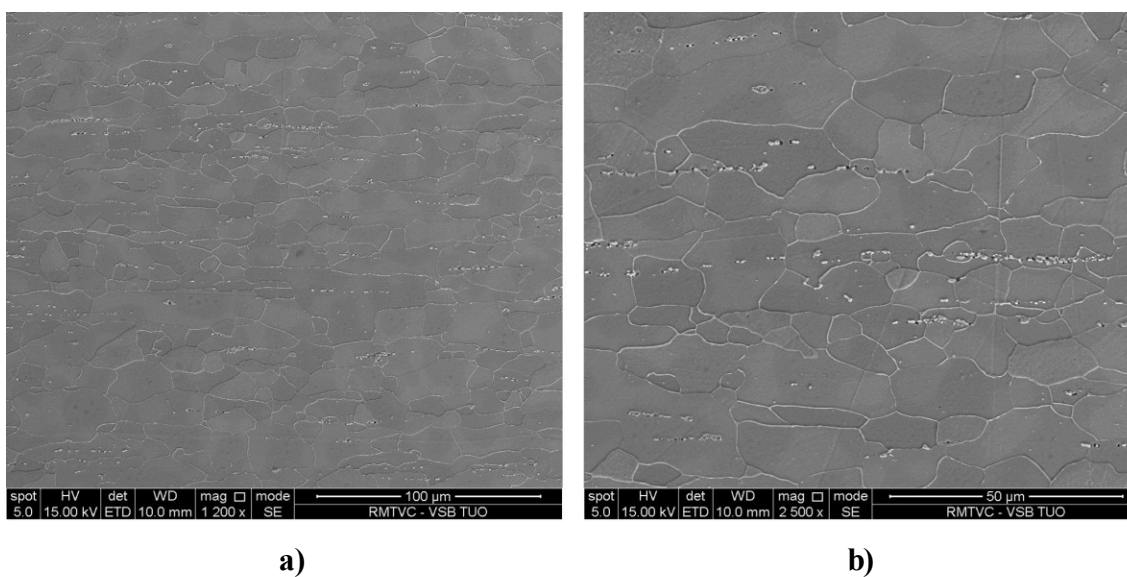
b)

**Obr. 3.52** Mikrostruktura TOO v pásmu částečné překrystalizace

a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x

Základní materiál (Obr. 3.53) je tvořen jemnými feritickými zrní protaženými ve směru válcování plechu. V této struktuře se dále vyskytují nesouvislé pásy tvořené jemnými karbidickými částicemi. Tyto částice byly pomocí EDX identifikovány jako karbidy železa.

V mikrostruktuře ZM se také vyskytovaly jemné nekovové vměstky (Obr. 3.54) v řádkovém uspořádání, které byly za pomoci EDX identifikovány jako sulfidy Mn a Al.



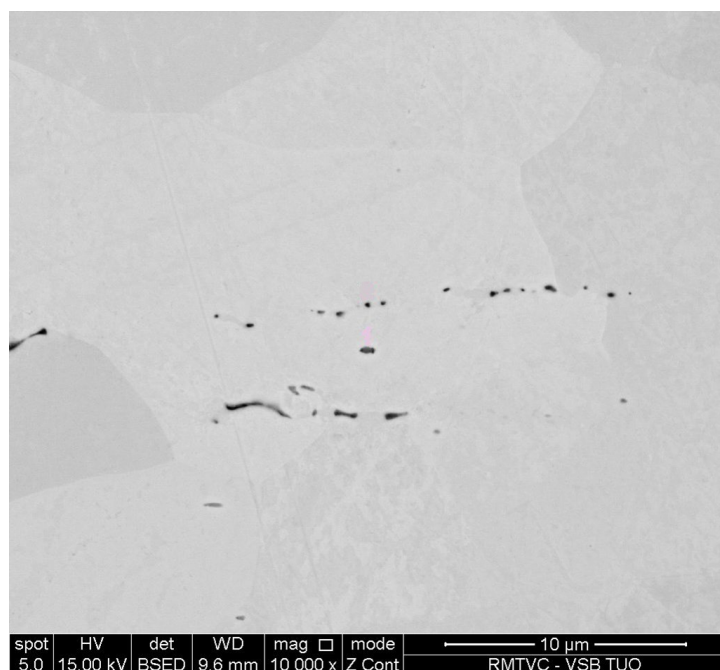
a)

b)

**Obr. 3.53** Mikrostruktura základního materiálu

a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x

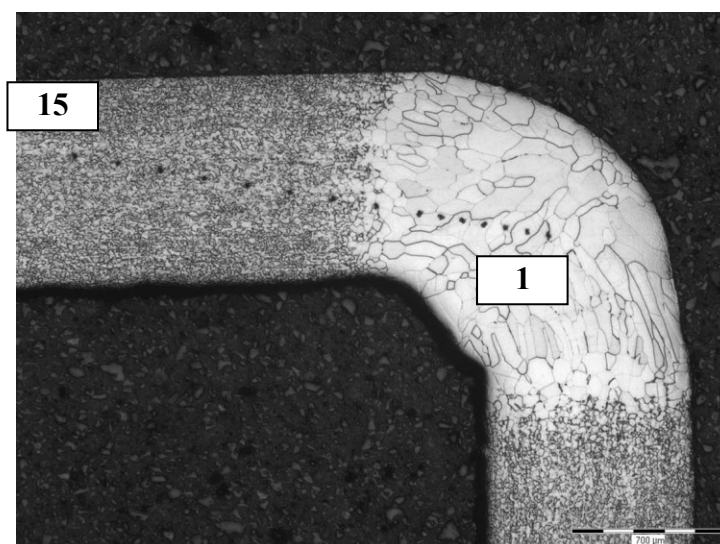




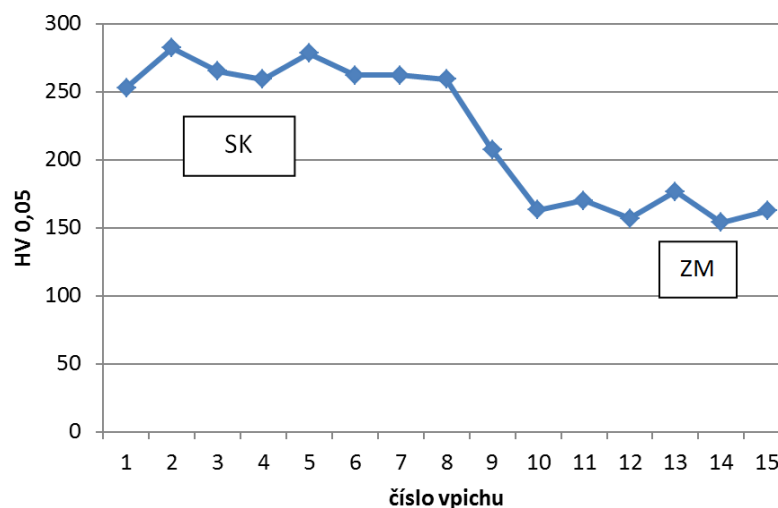
**Obr. 3.54** Nekovové vměstky v základním materiálu

### 3.3.6 Výsledky zkoušek vzorku L7

Z profilu mikrotvrdomosti HV0,05 (Obr. 3.56) je patrné, že rozdíl tvrdosti mezi ZM a SK je přibližně 110 jednotek HV0,05. Tvrdost v ZM se pohybuje okolo hodnoty 160 HV0,05 a v SK okolo 270 HV0,05. Tvrdost TOO tvoří plynulý přechod tvrdosti ze ZM do SK.



**Obr. 3.55** Makrovýbrus vzorku L7 s viditelnými vpichy indentoru

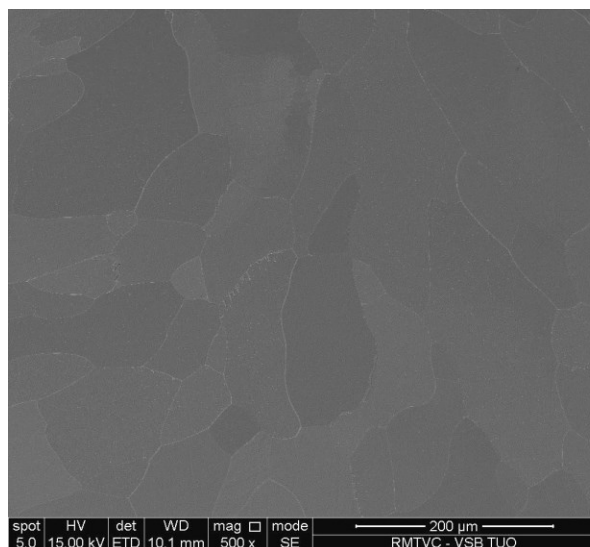


**Obr. 3.56** Profil mikrotvrdosti HV0,05 vzorku L7

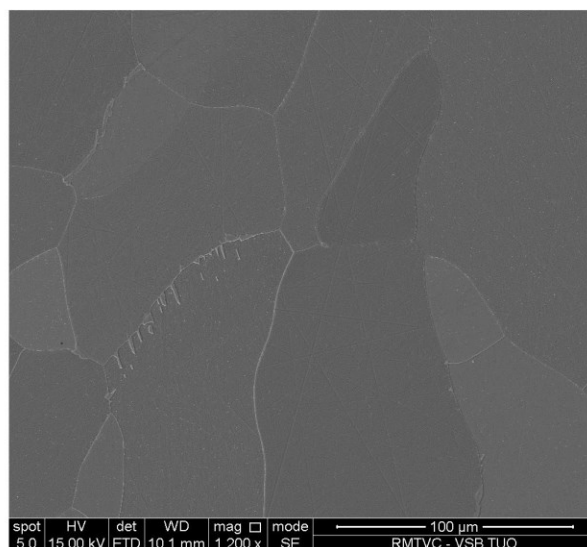
Mikrostruktura ve středu SK (Obr. 3.57) je tvořena hrubou lící strukturou tvořenou rovnoosými feritickými zrn, které jsou protaženy ve směru výšky svaru.

V oblasti svarového kovu v blízkosti TOO (Obr. 3.58) se skládá z protáhlých feritických zrn, které rostly ve směru odvodu tepla do ZM.

V SK se uvnitř zrn vyskytují velmi jemné částice (Obr. 3.59). Pomocí metody EDX bylo zjištěno, že se nejedná precipitáty, ale o oxidy. Velmi malá velikost oxidů je zapříčiněná extrémní rychlostí ochlazování svarové lázně. Přítomnost těchto oxidů naznačuje, že svarová lázeň nebyla dostatečně ochráněná inertním plynem v průběhu svařování.



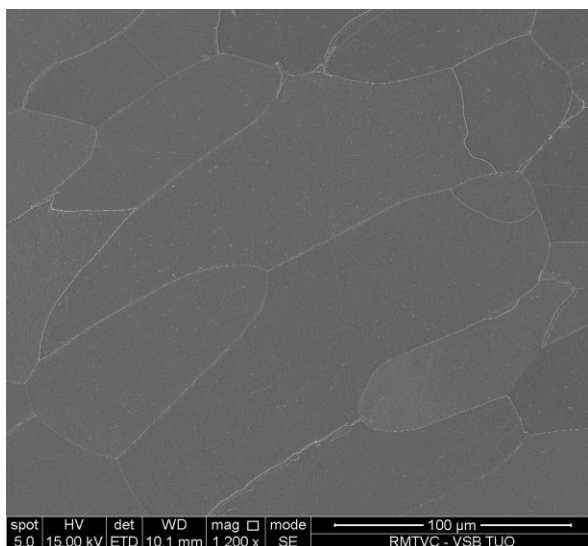
**a)**



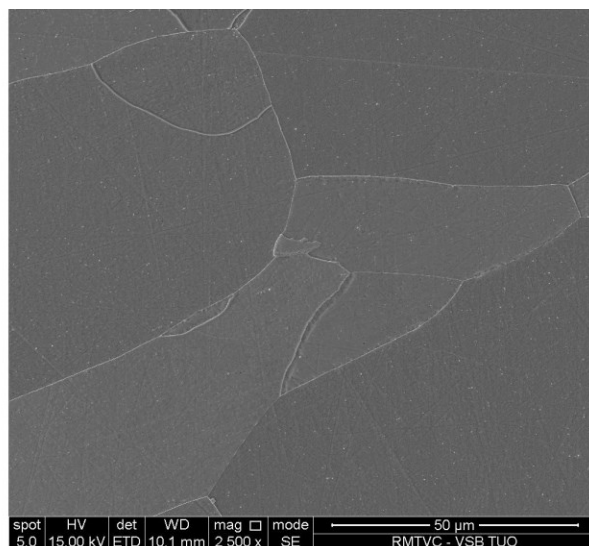
**b)**

**Obr. 3.57** Mikrostruktura ve středu SK

a) při zvětšení 500 x, b) při zvětšení 1 200 x



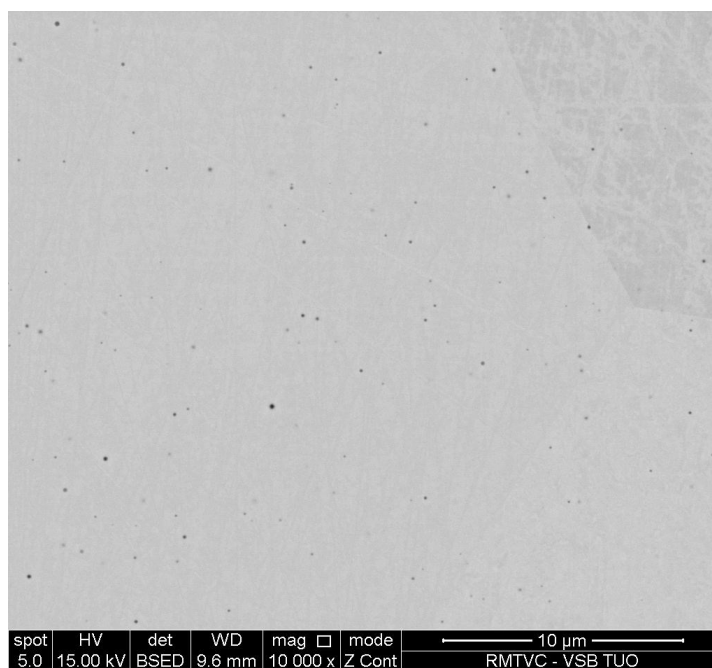
a)



b)

**Obr. 3.58** Mikrostruktura SK v blízkosti TOO

a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x

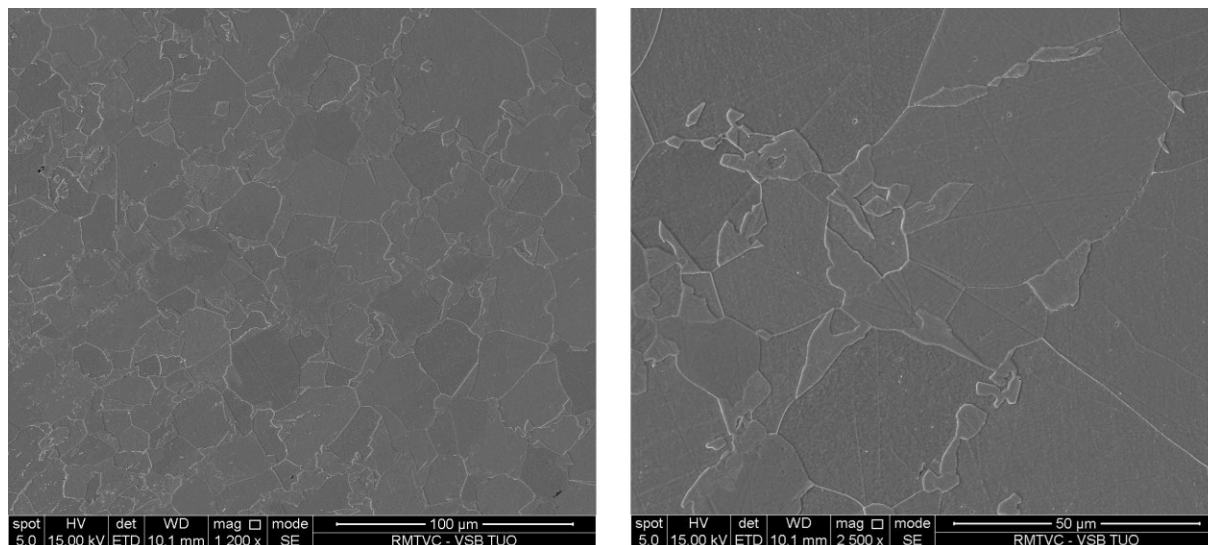


**Obr. 3.59** Jemné oxidické částice ve svarovém kovu

V mikrostruktuře oblasti přechodu SK – TOO (*Obr. 3.60a*) je pozorovatelné, že v ZM (levý spodní roh) jsou přítomny precipitáty, za to v TOO (*Obr. 3.60b – pravý horní roh*) se precipitáty nevyskytují a feritická zrna jsou zhrublá.



Jelikož se jedná o ocel s nepolymorfní přeměnou, v TOO lze pozorovat pouze pásmo přehřátí, ve které je viditelné zhrubnutí feritického zrna. TOO je široká přibližně 200  $\mu\text{m}$ .

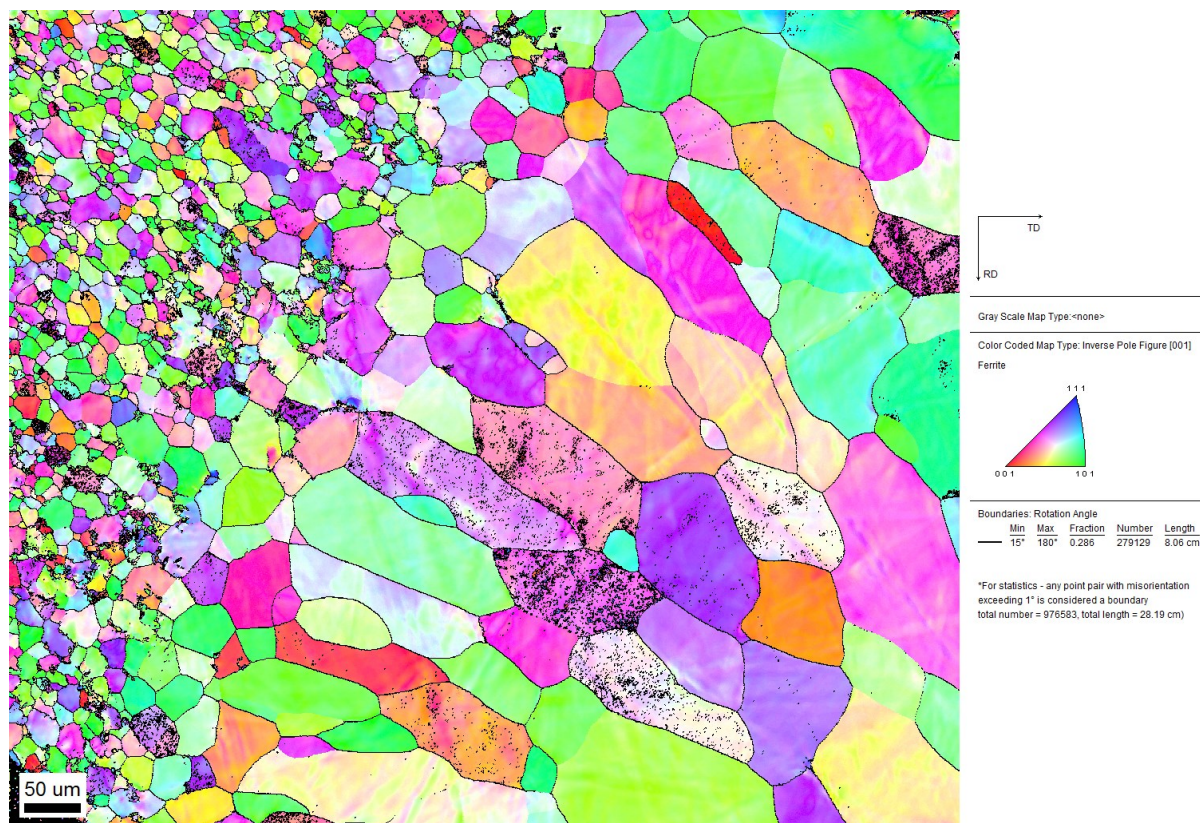


a)

b)

**Obr. 3.60** Mikrostruktura v oblasti přechodu SM - TOO

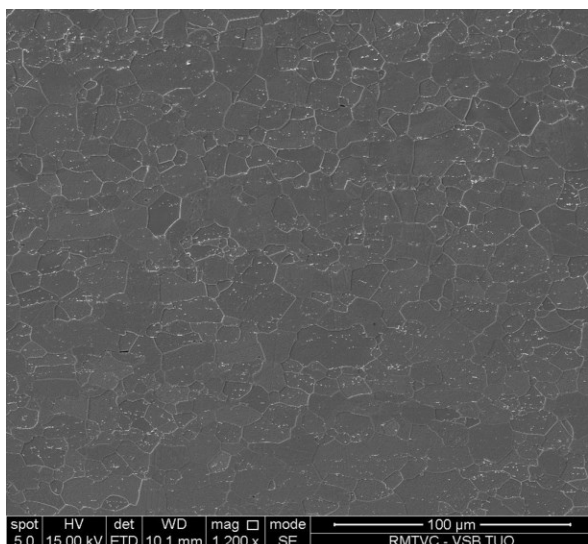
a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x (oblast TOO)



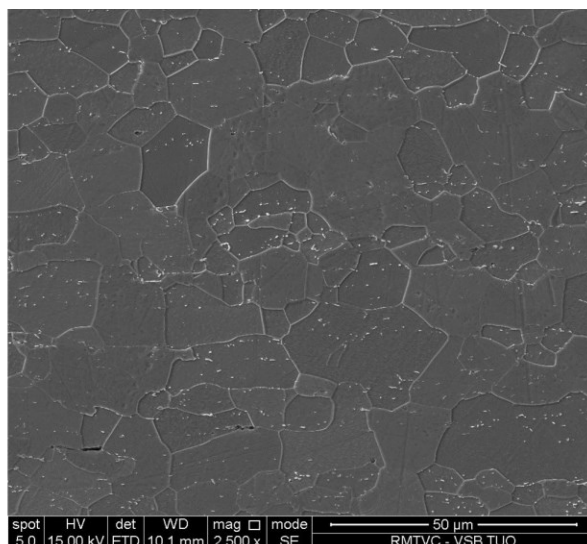
**Obr. 3.61** Mapa inverzního pólového obrazce pro směr ND s vysokoúhlovými hranicemi zrn ( $\alpha > 15^\circ$ ) v oblasti rozhraní SK - TOO

Mikrostruktura ZM (*Obr. 3.62*) je tvořena rovnoosými velmi jemnými feritickými zrny o velikosti několika desítek  $\mu\text{m}$ . Ve feritických zrnech se ale vyskytují precipitáty, které jsou usměrněny ve směru válcování svařovaného materiálu. Dále se zde vyskytují rozválcované oxidické vměstky, které byly metodou EDX identifikovány jako komplexní oxidy Al, Cr, Mg, Mn a Si.

Precipitáty v ZM (*Obr. 3.63*) byly studovány TEM za použití extrakčních uhlíkových replik. Pomocí EDX bylo z precipitátu na replikách zjištěno, že se jedná minoritně o nitridy nebo karbonitridy a karbidy typu  $\text{M}_7\text{C}_3$ .



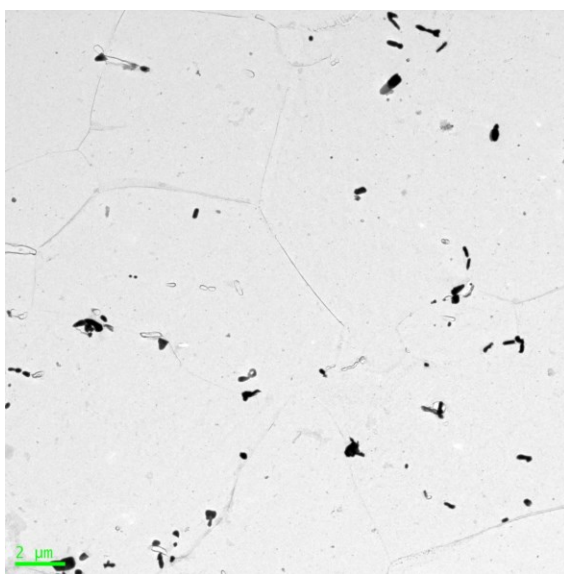
a)



b)

**Obr. 3.62** Mikrostruktura základního materiálu - TOO

a) při zvětšení 1 200 x, b) při zvětšení 2 500 x



**Obr. 3.63** Precipitáty v základním materiálu, extrakční uhlíková replika

### **3.4 Zhodnocení experimentů**

#### **Vzorek L1 – ocel DOMEX 420 MC D**

Při svařování tohoto vzorku metodou 52 došlo ke zvýšení tvrdosti přibližně o 100 HV<sub>0,05</sub> na hodnotu cca 270 HV<sub>0,05</sub> ve SK.

Ve výsledné mikrostruktuře po svařování je pozorovatelné, že v SK je zhrublá feriticko bainitická struktura bez přítomností karbidů ze ZM. Vyskytují se zde velmi jemné globulární oxidické vměstky (velikost v řádu pár 0,1 μm) které by neměly mít významný vliv na mechanické vlastnosti spoje. Jejich částečné odstranění by mělo být možné zlepšením ochrany svarové lázně inertním plynem v průběhu svařování, použitím ochranného plynu vyšší čistoty anebo lepším očištěním svarových ploch před svařováním.

TOO je díky použití metody 52 velmi úzká (do 200 μm) a došlo v ni jen k velmi malému zhrubnutí struktury, která i v pásmu přehřátí zůstala jemnozrná. V této oblasti je už pozorovatelný bainit ve feritické struktuře, který postupně přibývá ve směru k oblasti SK. Výskyt karbidů ze ZM se ve směru ke SK snižuje.

#### **Vzorek L3 – ocel S235JRG2**

Tvrdost tohoto vzorku byla zvýšena při svařování přibližně o 125 HV<sub>0,05</sub> na hodnotu okolo 350 HV<sub>0,05</sub> v oblasti SK. V oblasti rozhraní TOO – SK však tvrdost vykazovala hodnotu až 460 HV<sub>0,05</sub>, což je pro svarové spoje z tohoto materiálu nepřipustné. Na takto vyrobený svarový spoj by mělo být aplikováno žihání na snížení vnitřního pnutí za účelem snížení tvrdosti spoje pod hodnotu 320 HV.

Mikrostruktura SK je převážně bainitická s malým podílem feritu vyloučeném podél původních austenitických zrn. Vyskytuje se zde vysoká četnost globulárních oxidických a oxisulfidických vměstků, kterých je zde větší množství než v ZM a vznikly v průběhu svařování. Vměstky jsou velmi malé (přibližně 0,2 až 1 μm) a tak by neměly mít velký vliv na mechanické vlastnosti svarového spoje. Pro jejich částečné odstranění je vhodné zlepšit kvalitu očištění svarových ploch před svařováním, zlepšit ochranu svarové lázně při svařování nebo použít ochranný plyn vyšší čistoty.

Mikrostruktura TOO je v pásmech normalizace a přehřátí feriticko bainitická se zvyšujícím se podílem bainitu ve směru do SK. V pásmu částečné překrystalizace je

mikrostruktura tvořena bainitem, perlitem a útvary martenziticko-austenitické složky. TOO je velice úzká s šířkou menší než 200  $\mu\text{m}$ .

#### **Vzorek L4 – ocel X4CrNi18-12**

V horní části, v blízkosti povrchu, SK byly zjištěny 2 vady typu bublina velikosti 0,25 a 0,15 mm a dále pár bublin malého rozměru, které vznikly nejspíše z důvodu rychlého ochlazování svarové lázně, kvůli níž neměly dostatečný čas z něj vydifundovat. K odstranění těchto bublin by mohlo dojít při změně svařovacích parametrů a to hlavně snížením rychlosti svařování nebo zvýšením výkonu paprsku. Velmi účinné by bylo využít při svařování oscilaci paprsku, která pomocí speciálních drah pohybu paprsku docílí např. i zpomalení rychlosti ochlazování svarové lázně.

Po svařování tohoto vzorku nedošlo k velkému zvýšení tvrdosti, která se v rámci celého svarového spoje pohybuje v rozmezí od 200 do 225 HV<sub>0,2</sub>. Největší změny tvrdosti byly zaznamenány v TOO a v její blízkosti.

Mikrostruktura vykazuje ve všech oblastech spoje přítomnost malého množství martenzitu, které se do SK mohly dostat ze ZM, který jej obsahuje, anebo zde mohl být vytvořen při přípravě výbrusů vzorku (deformačně indukovaný martenzit). Struktura SK je austenitická se zrný protaženými ve směru odvodu tepla a s přítomností tenkých útvary  $\delta$ -feritu, které lemují austenitická zrna. Je zde přítomnost jemných globulárních oxidických vměstků (velikost do 0,5  $\mu\text{m}$ ), které by neměly mít velký vliv na mechanické vlastnosti svarové lázně). Alespoň částečné odstranění těchto vměstků by mělo být dosaženo zlepšením kvality ochrany svarové lázně nebo vyšší kvalitou očištění svarových ploch anebo použitím ochranného plynu vyšší čistoty.

V TOO došlo díky použité metodě svařování jen k velice malému zhrubnutí austenitického zrna, dokonce v linii částečného natavení k malému zjemnění zrna. V této oblasti se stejně jako v ZM vyskytují pásy  $\delta$ -feritu, které jsou usměrněné ve směru válcování polotovaru a uvnitř některých austenitických zrn také martenzit, o jehož původu, stejně jako v SK, si nejsme jisti.

### **Vzorek L5 – heterogenní svarový spoj oceli L555QB se slinutým karbidem K40**

U tohoto vzorku byl vytvořen heterogenní spoj dvou materiálů s velice odlišnou strukturou a tvrdostí obou materiálů. Tvrdost ZM oceli činila přibližně 500 HV<sub>0,1</sub> a tvrdost ZM slinutého karbidu dosahovala hodnoty až 2 000 HV<sub>0,1</sub>. Při svařování vznikla široká přechodová oblast, jejíž tvrdost se pohybovala v hodnotách okolo 750 HV<sub>0,1</sub>. V oblasti přechodu ocel – přechodová oblast je pozorovatelné nejprve změkčení struktury a následně zvýšení její tvrdosti o 250 HV<sub>0,1</sub>. Oblast přechodu z přechodové oblasti do ZM slinutého karbidu se vyznačuje skokovým zvýšením tvrdosti o přibližně 1 250 HV<sub>0,1</sub>. Celá tato přechodová oblast bude velice náchylná ke vzniku křehkého lomu, což se prokázalo i při přípravě vzorku zalisováním do bakelitu, kdy došlo k destrukci vzorku, která proběhla právě v této oblasti.

Přechodová oblast se vyznačuje velikou šířkou, která činí přibližně 1,7 mm, což svědčí o vnesení mnohem většího tepla během svařování, než tomu bylo u ostatních vzorků. V oblasti přechodu slinutý karbid – přechodová oblast vznikl útvar rozměru přibližně 0,5 x 0,3 mm, který je „vytečením“ promíšeného materiálu, který je tavně spojen se ZM slinutého karbidu. V této oblasti došlo ke vzniku kovové matrice, ve které jsou přítomny eutektické útvary tvořené tuhým roztokem W v Fe a wolframem bohatou karbidickou fází. V této oblasti mimo „vytečení“ je mikrostruktura podobná s tím rozdílem, že je ve struktuře menší množství a menší rozměry eutektických útvarů vzniklých při svařování.

V přechodové oblasti na straně k ZM oceli při svařování vznikla, z původní struktury tvořené popouštěným martenzitem, struktura martenzitická. Tento martenzit byl v oblasti přilehlé k ZM popouštěn, což je pozorovatelné i na profilu tvrdosti svarového spoje.

Pro zavedení tohoto svarového spoje do stavu reálného použití by bylo třeba provést důkladnější hodnocení svarového spoje s prioritním zaměřením na oblast rozhraní přechodové oblasti se ZM slinutého karbidu.

### **Vzorek L6 – ocel DC04**

Tvrdost SK dosahuje hodnoty okolo 200 HV<sub>0,2</sub>, což je navýšení tvrdosti o 75 HV<sub>0,2</sub>, v porovnání s oblastí ZM. Navýšení tvrdosti je v profilu svarového spoje pozvolné.

Ve svarovém kovu vznikla, oproti původní feritické struktuře ZM, struktura feriticko bainitická. Struktura jemně zhrubla a zrna byla protažena směrem k odvodu tepla. Ve



struktura se již nevyskytují karbidy železa, které se v průběhu svařování rozpustily. Ve struktuře se však vyskytuje velké množství jemných globulárních vměstků (velikosti přibližně 0,2 až 0,4  $\mu\text{m}$ ) tvořených oxidy a hlinitany. Tyto vměstky, díky své velikosti, nemají zásadní vliv na kvalitu svarového spoje a jeho mechanické vlastnosti. Částečnou eliminaci můžeme dosáhnout lepším očištěním svarových ploch před svařováním, aplikací ochranného plynu vyšší čistoty nebo zdokonalením ochrany svarové lázně během výroby svarového spoje.

Díky použité metodě svařování nám v TOO zhrubla struktura jen velice málo. Struktura pásem TOO je převážně feritická. V pásmu přehřátí je již zaznamenána přítomnost malého množství bainitu, v pásmu částečné překrystalizace je struktura poznamenána částečnou austenitizací. Až do oblasti normalizace jsou pozorovatelné rozpuštěné pásy jemných karbidů železa, které jsou součástí struktury ZM. Šířka TOO dosáhla pouze několika stovek  $\mu\text{m}$ .

#### **Vzorek L7 – ocel X6Cr13**

Tvrdost SK dosahuje průměrné hodnoty 270 HV<sub>0,05</sub>, což znamená navýšení tvrdosti o 110 HV<sub>0,05</sub> v porovnání se ZM. Oblast TOO tvoří na profilu tvrdosti plynulý přechod ze ZM do SK.

Mikrostruktura SK je tvořena hrubou lící strukturou tvořenou feritickými zrnky protaženými ve směru odvodu tepla do ZM. Precipitáty ze ZM se v této oblasti během svařování zcela rozpustily. V mikrostruktuře jsou přítomny jemné globulární oxidické vměstky (velikost přibližně 0,2  $\mu\text{m}$ ), které vznikly v průběhu svařování. Tyto vměstky nebudou mít pravděpodobně velký vliv na mechanické vlastnosti svarového spoje. Pro snížení výskytu těchto vměstků je vhodné docílit lepší kvality očištění svarových ploch před svařováním, zdokonalením ochrany svarové lázně v průběhu svařování nebo použitím inertního plynu vyšší čistoty.

V TOO došlo pouze ke zhrubnutí feritické struktury, která není poznamenána polymorfní přeměnou. Precipitáty byly v této oblasti zcela rozpuštěny. Celá oblast TOO je široká přibližně 200  $\mu\text{m}$ .

## **4. Diskuze výsledků a závěr**

Tato diplomová práce se v teoretické části ve všeobecnosti zabývá laserovým svařováním a principem vzniku svarového spoje touto metodou. Dále obsahuje i popis svařovacích zařízení, které se v dnešní době používají v rámci laserových aplikací v průmyslu, výčet svařovacích parametrů, které dle normy ČSN EN ISO 15609-4 slouží pro specifikaci svařovacího postupu a specifika svařitelnosti materiálů touto metodou svařování. V závěru této části jsou pak zhodnoceny výhody a nevýhody této metody. V rámci experimentální části bylo provedeno posouzení mikrostruktury svarových spojů s použitím elektronové mikroskopie a zkoušky mikrotvrdosti. Toto posouzení bylo provedeno na vzorcích z materiálů DOMEX 420 MC D, S235JRG2, X4CrNi18-12, X6Cr13, DC04 a heterogenního spoje oceli L555QB s břitem slinutého karbidu K40.

Svařováním materiálu DOMEX 420 MC D metodou 52 je možné docílit zvýšení produktivity svařování a odstranění nákladů za přídavný materiál. Dále ve svaru, oproti běžným metodám svařování, vznikají mnohem menší deformace a napětí ve spoji. Nevýhodou této aplikace je však zvýšená, pro běžnou kvalitu svarů však přípustná, tvrdost v oblasti SK. Zlepšení mechanických vlastností spoje by bylo možno dosáhnout změnou svařovacích parametrů (hlavně rychlosti svařování) nebo aplikací oscilace paprsku.

U materiálu S235JRG2 se projevilo velké zvýšení tvrdosti, které v pásmu částečného natavení přesahuje mezní hodnotu 380 HV, která je definovaná pro schválení svarového spoje z daného materiálu. Zvýšená tvrdost je způsobena vznikem bainitu ve struktuře svarového spoje, která je důsledkem velmi vysoké rychlosti ochlazování svarové lázně, typické pro metodu 52. Tento druh materiálu při použití běžných metod svařování nevykazuje tvorbu bainitické či martenzitické struktury. Snížení tvrdosti svarového spoje by mohlo být dosažitelné úpravou svařovacích parametrů, použitím oscilace laserového paprsku nebo i tepelným zpracováním spoje laserovým paprskem v rámci poslední operace svařování. Svarový spoj by mohl být, pro účel snížení tvrdosti spoje, podroben také žhání pro snížení vnitřního pnutí. V případě dosažení mechanických vlastností, porovnatelných s výrobou spoje běžnými metodami, by byla zvýšena produktivita výroby svarového spoje včetně odstranění nákladů za přídavný materiál a minimalizování deformace a napětí ve svarovém spoji.

Přeplátovaný svarový spoj vyrobený z pozinkovaného plechu oceli DC04 by mohl být velmi zajímavým příkladem přínosu metody 52 v případě, kdyby se prokázalo, že byl opravdu svařován bez odstranění povrchové vrstvy Zn, který zapříčiňuje vznik pórů a bublin ve svarovém spoji. Toto tvrzení by však šlo potvrdit až na základě zkoumání mikrostruktury dalších spojů vyhotovených z tohoto pozinkovaného plechu. Běžně se tyto plechy svařují až po odstranění vrstvy Zn, což by znamenalo vynechání této operace a tím snížení nákladů na výrobu spoje. Další předností je i zkrácení výrobních časů výroby spoje a odstranění aplikace přídavného materiálu. Daný svarový spoj však vykazoval i zvýšení tvrdosti ve SK, které je s největší pravděpodobností spojeno vznikem vměstků v průběhu svařování. I přesto je tento spoj z pohledu tvrdosti vyhovující. V případě nutnosti snížení tvrdosti svarového spoje je třeba zdokonalit ochranu svarové lázně inertním plynem a zlepšit očištění svarových ploch před svařováním.

Ideální použití metody 52 vykazuje svařování oceli X4CrNi18-12, jelikož při svařování nedochází k výraznému zhrubnutí struktury, čímž dochází pouze k minimální degradaci materiálu z pohledu jeho mechanických a protikorozních vlastností. Tyto materiály však vyžadují dokonalé očištění svarových ploch, jejíž nedodržení se může projevovat vznikem vměstků a bublin ve svarovém kovu. Pro eliminaci pórů ve SK je možné zlepšit kvalitu očištěním svarových ploch před svařováním a prodloužením teplotního cyklu svařování (oscilace paprsku, snížení rychlosti svařování) tak, aby mohl vzniklý plyn vydifundovat ze svarové lázně během tuhnutí a nezůstal tak uzavřený uvnitř SK, jak tomu bylo u našeho vzorku.

Feritické oceli, stejně jako naše ocel X6Cr13, jsou velmi náchylné ke zhrubnutí struktury ve svarovém spoji, což se zde metodou 52 nepodařilo výrazně ovlivnit. Aplikací této metody je však možné snížit náklady na výrobu spoje. Lepším očištěním svarových ploch před svařováním by také mohlo dojít ke snížení tvrdosti v oblasti SK a TOO.

Vyhodnocením heterogenního spoje oceli L555QB se slinutým karbidem K40 se prokázalo, že i v této kombinaci materiálů je možné vytvořit svarový spoj pomocí difuzního promíšení svařovaných materiálů. Svarový spoj se vyznačoval velmi prudkým nárůstem tvrdosti (cca 1 250 HV<sub>0,1</sub>) na rozhraní přechodové oblasti se základním materiálem slinutého karbidu. Tato oblast byla dále náchylná ke vzniku a šíření křehkého lomu. Tento svarový spoj tedy není vhodný pro aplikace s dynamickým namáháním spoje, jako např. v oblasti obrábění. Pro zlepšení vlastností celého spoje je třeba prioritně se zaměřit na zlepšení vlastností daného problematického rozhraní a jeho okolí. Jedna z možností zlepšení vlastností tohoto rozhraní může spočívat v aplikaci tenké mezivrstvy z vhodného materiálu, která se vloží mezi



svařovanou ocel a slinutý karbid, čímž lze toto rozhraní modifikovat. Tento heterogenní svarový spoj by bylo možné aplikovat například v oblasti konstrukce obráběcích nástrojů, kde by nahradil spoje břitu ze slinutého karbidu s ocelovým tělesem obráběcího nástroje, které se dnes nejčastěji pájí. Touto náhradou by se docílilo značných ekonomických úspor díky odstranění aplikace pájek pro tvorbu spoje a zvýšením produktivity výroby nástroje.

Pro zkvalitnění a hlubší posouzení daných svarových spojů by bylo vhodné dané hodnocení doplnit i o další destruktivní zkoušky, jako jsou příčná zkouška tahem, zkoušky lámavosti (příčná a podélná) a zkouškou rázem v ohybu. Dále by bylo vhodné provést i vyhledávání a posuzování vad ve svarových spojkách za pomoci nedestruktivních zkoušek svarových spojů.

Hodnocení mikrotvrdosti svarových spojů by pro zkvalitnění výsledků mělo být posouzeno dle normy ISO 22826, která definuje postup hodnocení mikrotvrdostí svarových spojů vyhotovených elektronovým a laserovým svařováním.

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Drahomíru Schwarzovi, CSc. za vstřícný přístup, cenné připomínky a rady týkající se zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. a Ing. Pavlu Sonnkovi, Ph.D. za velmi cenné informace a připomínky týkající se technologie laserového svařování a svařitelnosti materiálů. Za poznatky, informace a připomínky týkající se elektronové mikroskopie, stavby a dějích v mikrostruktuře strojírenských materiálů bych tímto chtěl poděkovat prof. Vlastimilu Vodárkovi, CSc. A v neposlední řadě bych chtěl také poděkovat Ing. Karlu Mertovi ze společnosti VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o. za vstřícný přístup při rozboru chemického složení materiálů vzorků L5, L6, L7.

## Seznam použité literatury

- [1] ŠMÍRA, Pavel. *Moderní metody svařování aplikované v ČR*. Ostrava, 2011. 62 s. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.
- [2] KOŘÁN, Pavel. Poslední trendy ve svařování laserem. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2009, 7. října 2009 [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/posledni-trendy-ve-svarovani-laserem.html>
- [3] KUBÍČEK, Jaroslav a Libor MRŇA. Technické aspekty svařování laserem. In: *Svařák.cz* [online]. Brno, 2008, 14.března 2008 [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: <http://svarak.cz/images/stories/pdf/Svarov%C3%A1ni%20laserem.pdf>
- [4] KUBÍČEK, Jaroslav, Jan HYKEL a Libor MRŇA. Svařování laserem v podmínkách současné technické praxe. In: *Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování: 11. ročník odborného semináře*. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., Ostrava, 2008, s. 75-85. ISBN 978-80-248-1825-2.
- [5] AMBROŽ, Petr a Jiří DUNOVSKÝ. Svařování kovových materiálů laserem. *METAL 2010: 19th International Metallurgical and Materials Conference : conference proceedings* [online]. Ostrava: Tanger, 2010, roč. 19, s. 6 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: [http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal\\_10/lists/papers/191.pdf](http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_10/lists/papers/191.pdf)
- [6] The Nobel Prize in Physics 1964. *Nobelprize.org* [online]. 4th March 2013 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1964/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1964/)
- [7] NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4): Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2012, č. 9, s. 126. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
- [8] Stimulovaná emise. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 5. 3. 2013 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Stimulovan%C3%A1\\_emise](http://cs.wikipedia.org/wiki/Stimulovan%C3%A1_emise)

[9] ZEMÁNEK, Jan. *Vliv degradačních vlastností na svarové spoje feritických a austenitických ocelí*. Ostrava, 2010. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava; Katedra mechanické technologie Fakulta strojní. Vedoucí práce doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

[10] BLEHER, Jens. Každá laserová technologie má svůj potenciál. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2008, č. 10, s. 28-29. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kazda-lasero-va-technologie-ma-svuj-potencial.html>

[11] HAVRILLA, David a Rüdiger BROCKMANN. Třetí generace diskových laserů. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2009, č. 11. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/treti-generace-diskovych-laseru.html>

[12] SCHWOERER, Thomas. Remote Scanner Welding: Using latest laser technologies. *Auto Focus Asia* [online]. 2008 [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: [http://www Autofocusasia.com/production\\_manufacturing/remote\\_scanner\\_welding.htm](http://www Autofocusasia.com/production_manufacturing/remote_scanner_welding.htm)

[13] ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2009, č. 7. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-lasero-ve-technologie-a-stroje-s-laserem.html>

[14] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery: Laserové svařování I (Laser Welding). *LAO: Laser a optika* [online]. 2011, č. 8 [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---lasero-ve-svarovani-i-laser-welding-134>

[15] TURŇA Milan a Pavel KOVAČÓCY. *Zváranie laserovým lúčom*. 1. vyd. Bratislava: STU v Bratislave, 2003, 90 s. 5061. ISBN 80-227-1921-8.

[16] The new Desktop. *Rofin* [online]. [2010], 14.02.2013 [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.rofin.com/desktop/index.html>

[17] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, 2009, 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.

[18] BENKO, B., P. FODREK, M. KOSEČEK a R. BIELAK. *Laserové technologie*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2000. ISBN 80-227-1425-9.

[19] SZTEFEK, Radek. *Teorie svařování: Teorie svařování laserem*. Ostrava, 2011. Semestrální práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

[20] ČSN EN ISO 15609-4. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Stanovení postupu svařování - Část 4: Laserové svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

[21] ČÍP, Tomáš. *Svařování vysokopevnostních ocelí laserem*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

[22] BARTOŠ, Václav. *Optimalizace svařovacích parametrů pro technologii svařování laserem u vybraných termoplastů*. Zlín, 2009. Diplomová práce. Universita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Libuše Sýkorová.

[23] ČSN EN ISO 9015-2. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2011.

[24] VODÁREK, Vlastimil. *Metody studia struktury*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2559-5.

[25] ŠAFÁŘOVÁ, Klára. Skenovací (rastrovací) elektronová mikroskopie: 4.12. Workshop: Mikroskopické techniky SEM a TEM. In: [online]. Olomouc: Centrum pro výzkum nanomateriálů [cit. 2013-15-05]. Dostupné z: [http://nanosystemy.upol.cz/upload/18/safarova\\_sem.pdf](http://nanosystemy.upol.cz/upload/18/safarova_sem.pdf)

[26] DOMEX High strength steel: Domex 420 MC. *SAAB* [online]. Borläng: SSAB EMEA A, 2005 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: [http://www.ssab.com/Global/DOMEX/Datasheets/en/414\\_Domex%20420%20MC.pdf](http://www.ssab.com/Global/DOMEX/Datasheets/en/414_Domex%20420%20MC.pdf)

[27] Jakosti ocelí. *Feromat: Hutní a spojovací materiály* [online]. Brno: Feromat Brno, s.r.o., 2010 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: [http://www.feromat.cz/jakosti\\_oceli](http://www.feromat.cz/jakosti_oceli)

[28] BOHDAN BOLZANO S.R.O. *Technická příručka* [online]. Kladno, 2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/>

[29] NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY KHPI. *European Steel and Alloy Grades* [online]. Kharkov, 2011 - 2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.steelnumber.com/>

[30] Sortimentní katalog: Materiálové normy. *Feron: Velkoobchod hutním materiálem* [online]. Praha 1: Feron, a.s., © 2004–2013 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: [http://www.feron.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.feron.cz/cze/katalog/mat_normy.php)

[31] Steel 1.4303: X4CrNi18-1. *DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE* [online]. Witte: DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMB, 1.8.2007 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: [http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4303\\_en.pdf](http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4303_en.pdf)

[32] TUMLIKOVO. *Tumlikovo: Metal Cutting Technologies* [online]. © 2010 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/>

[32] ULTRA-MET. *Ultra-met®: Carbide Technologies* [online]. Urbana, ©2011 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.ultra-met.com/index.html>